FÍSICA DE PARTÍCULAS
El enigma del neutrón

EVOLUCIÓN HUMANA
¿Cómo influyó la talla lítica en nuestra mente?

MATEMÁTICAS
A. Grothendieck, genio y ermitaño

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Junio 2016 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

EL CUERPO CONTRA EL CÁNCER

Los últimos avances en inmunoterapia abren un nuevo frente para combatir la enfermedad

INFORME ESPECIAL
Aplicaciones de la biología sintética



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
INMUNOTERAPIA CONTRA EL CÁNCER | EL ENIGMA DEL NEUTRÓN | BIOLOGÍA SINTÉTICA
JUNIO 2016 N.° 477



Expert Database of Outstanding
Female Academics

AcademiaNet is a unique service for research facilities, journalists and conference organisers searching for outstanding female academics with boardroom experience and management skills on top of their excellent qualifications.

AcademiaNet, the European expert database of outstanding female scientists, offers:

- Profiles of highly qualified female academics from every discipline – nominated by renowned scientific organisations and industry associations
- Customised search options according to discipline and area of expertise
- Current news about »Women in Science«

Robert Bosch Stiftung





An initiative of the Robert Bosch Stiftung in cooperation with Spektrum der Wissenschaft and Nature Publishing Group

www.academia-net.org

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Junio 2016, Número 477


28

MARK ROSS

ARTÍCULOS

MEDICINA

18 **Las defensas contra el cáncer**
La estimulación del sistema inmunitario está dando resultados prometedores en la lucha contra el cáncer. *Por Karen Weintraub*

COGNICIÓN HUMANA

28 **¿Cómo nos cambió la fabricación de herramientas?**
Las neuroimágenes comienzan a revelar la manera en que la talla lítica moldeó nuestras facultades cognitivas. *Por Dietrich Stout*

INFORME ESPECIAL: BIOLOGÍA SINTÉTICA

36 **Computadoras biológicas**
Los biólogos sintéticos han creado células que operan como ordenadores rudimentarios. Con ellas pronto se podrán diagnosticar y tratar enfermedades, entre otras tareas. *Por Timothy K. Lu y Oliver Purcell*

42 **Hacia una bioingeniería del planeta**
La aplicación de métodos de biología sintética al diseño de nuevas interacciones ecológicas podría ayudarnos a evitar el colapso ambiental. *Por Ricard V. Solé, Raúl Montañez y Salva Duran-Nebreda*

FÍSICA DE PARTÍCULAS

56 **El enigma del neutrón**
Dos técnicas de precisión arrojan valores distintos para el tiempo que tardan los neutrones en desintegrarse. ¿Se trata de un error experimental, o hay un misterio más profundo? *Por Geoffrey L. Greene y Peter Geltenbort*

ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

62 **El coste de los recursos en un planeta que cambia**
Al empezar este siglo, la fracción de la producción mundial dedicada a energía y alimentación era la más reducida de la historia. Puede que esa situación no vuelva a darse. *Por Carey W. King*

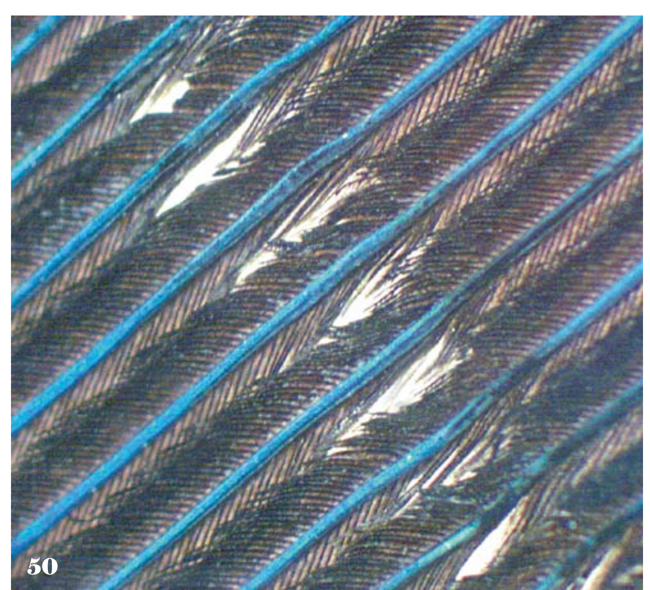
QUÍMICA

72 **El arte de salvar reliquias de plástico**
El plástico presente en los trajes espaciales del programa Apolo, en las pinturas de Andy Warhol y en otras piezas de museo está deshaciéndose. Los expertos investigan cómo rescatar estos tesoros. *Por Sarah Everts*

MATEMÁTICAS

78 **Alexander Grothendieck, de eminencia a eremita**
Tras una infancia azarosa y pese a una formación académica deficiente, este gran matemático adquirió en poco tiempo fama mundial. A los 63 años, lo abandonó todo para vivir en soledad. *Por Winfried Scharlau*







INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Educados desde el huevo. Gafas sin graduación. Las herramientas de la primera infancia. Tratamientos que alcanzan el cerebro. Nadie quiere a los animales «feos». Un paso del Noroeste para Internet. Fallas rápidas. Cuando el ADN señala al inocente.

11 Agenda

12 Panorama
Exoplanetas con materia oscura. *Por Laura Tolos*
Redes tróficas reestructuradas. *Por Julia L. Blanchard*
Detener la metástasis. *Por Héctor Peinado*
¿Dónde caen más rayos? *Por Mark Fischetti*

50 De cerca
Las plumas y la salud de las aves.
Por María Valladolid y Manuela Gallardo

52 Historia de la ciencia
La *Fabrica* de Vesalio.
Por Sachiko Kusukawa

55 Foro científico
¿Influye la alimentación en el cáncer?
Por Carlos A. González Svatetz

86 Taller y laboratorio
Materiales cerámicos.
Por Marc Boada Ferrer

90 Juegos matemáticos
Juegos infinitos.
Por Alejandro Pérez Carballo

92 Libros
Célula. Estrellas enanas blancas.
Por Luis Alonso

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

En los últimos años, los novedosos tratamientos que potencian el sistema inmunitario del propio paciente para combatir el cáncer han obtenido resultados alentadores en numerosas personas con ciertos tumores. En la actualidad, los investigadores están perfeccionando estas inmunoterapias para aumentar su seguridad y eficacia. Ilustración: Linfocitos T atacando a una célula cancerosa; iStock/luismmolina



redaccion@investigacionyciencia.es



Abril 2016

¿EXOPLANETA X?

En los artículos sobre el Planeta X [«En busca del Planeta X», por Michael Lemonick, y «¿Se ha encontrado el Planeta Nueve?», por Pablo Santos Sanz; Investigación y Ciencia, abril de 2016] se menciona la posibilidad de que este planeta gigante se haya formado junto con el resto de los planetas en los inicios del sistema solar y que, más tarde, haya sido expulsado por efectos gravitatorios a zonas más alejadas.

Sin embargo, cabe especular con la posibilidad de que se trate de un planeta errante procedente de otra generación anterior de estrellas, el cual escapó de su órbita y acabó atrapado por la influencia gravitatoria del Sol. Lo mismo podría ocurrir con los planetas enanos y otros objetos distantes, lo que tal vez daría cuenta de la excentricidad de sus órbitas. ¿Es esta idea demasiado descabellada?

Juan Malonda
Gandía

Responde Santos Sanz: *La hipótesis de un planeta errante o exoplaneta capturado por la gravedad del Sol podría explicar el origen de un cuerpo como el Planeta X en nuestro sistema solar. De hecho, algunos autores, como Alexander Mustill y colaboradores, han defendido recientemente esta posibilidad («Is there an exoplanet in the Solar System?»,* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, *en prensa).*

Sin embargo, el mayor problema de esta hipótesis sería la estabilidad orbital de dicho planeta. Es muy improbable que un exoplaneta capturado por el Sol tuviera una órbita estable durante cientos o miles de millones de años, algo necesario para que las órbitas de los objetos transneptunianos hayan sido alteradas como observamos en la actualidad. Lo mismo sucede con la posibilidad de que se hubiera formado más cerca del Sol para luego ser expulsado hacia los confines del sistema solar: también en ese caso es muy difícil conseguir una estabilidad orbital de cientos de millones de años. Ambas posibilidades han sido analizadas hace poco por Gongjie Li y Fred Adams («Interaction cross sections and survival rates for proposed Solar System member Planet Nine», The Astrophysical Journal Letters, *en prensa), quienes obtienen una probabilidad menor del 5 por ciento de que tales hipótesis expliquen el origen de un planeta masivo y tan lejano. Lo que sí podría suceder es que cuerpos más pequeños, como cometas o asteroides, tuviesen un origen extrasolar, como hace algunos años apuntaron Harold Levison y colaboradores («Capture of the Sun's Oort cloud from stars in its birth cluster»;* Science, *vol. 329, 2010).*

¿Cómo se habría formado entonces el hipotético Planeta X? Una posibilidad es que la nebulosa presolar, la nube de gas y polvo que dio lugar al Sol y a los demás cuerpos del sistema solar, se extendiera mucho más lejos de lo que pensamos. En ese caso, habría habido material suficiente para que, al mismo tiempo que el resto de los planetas, se formase un planeta gigante a cientos de unidades astronómicas del Sol. Cuando este planeta —o quizá planetas, como han propuesto hace poco Matthew Holman y Matthew Payne («Observational constraints on Planet Nine: Astrometry of Pluto and other trans-Neptunian objects», arXiv:1603.09008)— se detecten, saldremos de dudas y podremos decir mucho más sobre su origen.

REACCIONES Y REPRESENTACIONES

La nota «Ni aquí ni allí» [por Charles Schmidt; Apuntes, Investigación y Ciencia, abril de 2016], sobre los estados de transición de una reacción química, viene acompañada de una ilustración muy frecuente en los libros pero incorrecta. En las abscisas se indica «reacción», que otras veces se etiqueta como «tiempo de reacción», «avance de la reacción» o «conversión», pero nunca se define con precisión de qué magnitud física se trata o qué unidades tiene.

De hecho, debería suprimirse la abscisa, porque lo que se pretende visualizar es que los reactantes $A + B$ tienen una energía distinta a la del producto AB y a la del estado de transición. El diagrama debería ser parecido al que representa las energías de orbitales enlazantes y antienlazantes; de esa manera, cobrarían sentido las líneas horizontales asociadas a $A + B$ y a AB.

A veces se etiqueta la abscisa como «coordenada de reacción». Este es un concepto avanzado que en estos diagramas cualitativos no debería usarse, puesto que no se representa la evolución del sistema reaccionante en función de un parámetro geométrico, como la distancia entre núcleos (una de las posibles coordenadas de reacción), sino solo el estado inicial, el final y el estado de transición.

Claudi Mans i Teixidò
Catedrático emérito de ingeniería química
Universidad de Barcelona

Nota de los editores: *Los lectores interesados en profundizar en los aspectos pedagógicos de la observación de Mans tal vez deseen consultar el artículo «Coordenada de reacció?», Claudi Mans i Teixidó,* Educació Química EduQ (Societat Catalana de Química), *n.º 11, 2012; el PDF puede descargarse en doi.org/10.2436/20.2003.02.79*

Erratum corrige

Como apunta nuestro lector Marcelo Male, el artículo **Maridaje de alimentos: ¿arte o ciencia?** [por Pere Castells; Investigación y Ciencia, enero de 2016] data erróneamente en 1908 la publicación de la teoría atómica de Dalton. El año correcto es 1808.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



EL MALURO DORSIRROJO, oriundo del norte y el este de Australia, suelta tres o cuatro huevos por puesta.

ETOLOGÍA

Educados desde el huevo

Algunos pájaros enseñan a cantar a sus polluelos antes de nacer

Ya en el vientre materno, un bebé puede percibir las diferencias entre voces y sonidos fuertes, siendo incluso capaz de distinguir la voz de su madre de la de otras mujeres. Pero, en lo que a aprendizaje embrionario se refiere, las aves no tienen nada que envidiarnos. Según un estudio publicado hace poco en *The Auk: Ornithological Advances*, algunas madres enseñan a su prole a cantar antes de romper el cascarón; como consecuencia, los polluelos pueden imitar la llamada materna a los pocos días de haber nacido.

Los primeros indicios del fenómeno fueron observados en 2012 por Sonia Kleindorfer, bióloga de la Universidad Flinders, en Australia Meridional, quien se percató de que las hembras de maluro soberbio (*Malurus cyaneus*) repetían una y otra vez una melodía mientras incubaban la puesta. Al nacer, los polluelos emitían el mismo canto que la madre, lo que les servía como reclamo para recibir alimento.

A fin de averiguar si dicho comportamiento se daba en más pájaros, los investigadores decidieron estudiar el maluro dorsirrojo (*Malurus melanocephalus*), otra ave australiana. Para ello, registraron los sonidos procedentes de 67 nidos de cuatro lugares de Queensland en varios momentos, desde la incubación de los huevos hasta después de la eclosión. Luego identificaron las llamadas de reclamo de los polluelos analizando el orden y el número de notas. Por último, un sistema informático comparó a ciegas los cantos de las madres y de las crías y los clasificó según su semejanza.

Según el estudio, también los polluelos de maluro dorsirrojo nacen cantando de un modo muy similar a sus madres. De hecho, cuanto más cantan estas a los huevos, tanto más se parece el reclamo emitido por las crías. Además, un experimento complementario pareció indicar que los mejores imitadores eran los que más alimento recibían.

El hallazgo sugiere que un aprendizaje embrionario eficaz serviría para indicar a los padres la aptitud neurológica de la descendencia. A su vez, ello permite extraer una conclusión evolutiva. «Como progenitor, ¿inviertes en una descendencia de calidad o en una dependiente?», se pregunta Kleindorfer. «Nuestros resultados indican que en una de calidad.»

—Rachel Nuwer

MARTIN WILLIS, CORBIS

TECNOLOGÍA

Gafas sin graduación

Un nuevo tipo de lente ajusta la distancia focal de manera automática



Con la edad, muchas personas necesitan lentes bifocales o varios pares de gafas para poder ver bien tanto de cerca como de lejos. Deep Optics, una compañía emergente israelí, está investigando una nueva posibilidad: lentes que se enfocan de modo automático según aquello a lo que esté mirando su portador. Estas gafas «omnifocales» ajustan la distancia focal por medio de la interacción entre una corriente eléctrica y un cristal líquido, un material cuyas moléculas actúan a la vez como en un líquido y en un sólido.

Aunque la técnica ya se aplica en algunas cámaras de teléfonos móviles, aún no se ha logrado adaptar a lentes mayores. Por ahora, Deep Optics ha construido una lente operativa de 20 por 20 milímetros y un sistema de detección de distancias. Una vez integrados en unas gafas, ambos componentes permiten cambiar casi al instante la graduación en función del lugar al que dirija la mirada el usuario.

La empresa planea tener un prototipo en tamaño real para dentro de dos años. Su director general, Yariv Haddad, vaticina que la técnica podrá también aplicarse a dispositivos de realidad aumentada y de realidad virtual; hoy por hoy, estos muestran los objetos a una misma distancia, lo que genera borrosidades y causa desorientación.

—Jordana Cepelewitz

Así funciona

1. El portador de las lentes dirige la vista hacia un objeto. Unos sensores infrarrojos instalados en la montura miden la distancia entre las pupilas y envían esa información a una unidad de procesamiento incorporada en las gafas, la cual determina la distancia al objeto.

2. A partir del cálculo de la distancia, una batería recargable envía una corriente eléctrica a través de las lentes. Estas constan de tres capas: una central de cristal líquido, de un micrómetro de grosor, y dos exteriores de vidrio recubierto con óxido de estaño e indio, un material conductor transparente.

3. Cuando el voltaje de la capa de cristal líquido cambia, la orientación y la distribución de los cristales se modifica, lo que a su vez altera la trayectoria de la luz a través de las lentes. Como resultado, el índice de refracción varía. (En las gafas normales, el mismo efecto se consigue ajustando el grosor de las lentes.) Este ajuste tarda entre 100 y 300 milisegundos en producirse, un tiempo muy próximo a los 300 milisegundos que necesita el ojo humano para enfocar.

COGNICIÓN

Las herramientas de la primera infancia

Los niños pequeños y los chimpancés parecen compartir una capacidad innata para manejar utensilios

En las profundidades de los montes Mahale, en Tanzania, un chimpancé deshoja una rama y la hunde en el suelo. Cuando la levanta, sale llena de sabrosas termitas. El animal las sorbe y, acto seguido, se dispone a pescar más aperitivos de seis patas.

En la otra punta del mundo, un niño británico de tres años de edad está sentado frente a una caja de cartón. Por un pequeño agujero se ve que dentro hay tres esponjas. Si las saca, le darán una pegatina. Sin que nadie le haya enseñado cómo proceder, el niño toma una varilla de madera cubierta de velcro que tiene cerca. Piensa que las esponjas se pegarán al velcro... y tiene razón, por lo que rápidamente recibe el premio.

En estos ejemplos, el primate tanzano solo está siguiendo su rutina diaria. El primate británico, en cambio, participa en un experimento diseñado para averiguar si el uso de ciertas herramientas es instintivo.

Las semejanzas entre ambos casos no son casuales. La investigación buscaba comparar las facultades cognitivas de los humanos y los grandes simios tomando como modelo, para las pruebas con niños, la manera en que chimpancés y orangutanes salvajes usan herramientas. En un grupo de 50 niños de entre dos y tres años y medio de edad, los investigadores comprobaron que la frecuencia de ciertas conductas relacionadas con el uso de herramientas era similar a la observada en los simios. Comportamientos comunes entre estos, como pescar termitas, también se daban menudo en los niños que se enfrentaban a situaciones análogas. Y las conductas menos frecuentes en los animales, como usar una piedra para romper la cáscara de un fruto seco, eran también más raras entre los pequeños. En total, los niños resolvieron once de doce pruebas. Para la psicóloga de la Universidad de Birmingham Eva Reindl, directora del estudio, el hecho de que los niños exhibiesen las conductas adecuadas refleja la existencia de una capacidad instintiva para usar herramientas simples.

Los resultados, que fueron publicados el pasado mes de febrero en *Proceedings of the Royal Society B*, ponen en duda la creencia dominante de que los niños siempre tienen que aprender a usar herramientas. La idea se remonta al psicólogo soviético Lev Vygotsky, que en 1930 escribió que el uso espontáneo de herramientas por parte de los niños era «prácticamente nulo». Los hallazgos también sugieren que seres humanos y grandes simios podrían compartir un aparato cognitivo innato para entender y manipular el mundo físico.



—Jason G. Goldman

CORTESÍA DE ALON SHOAVI (*gafas*); THOMAS FUCHS (*niños*)

BIOLOGÍA

Tratamientos que alcanzan el cerebro

Los virus podrían hacer llegar medicamentos a este órgano al sortear la pared de células que lo rodea

El cerebro representa un desafío único para los tratamientos médicos, ya que está rodeado por una capa de células firmemente empaquetadas que lo hace impenetrable. Aunque la barrera hematoencefálica evita que los compuestos dañinos y las bacterias alcancen nuestro centro de control, también impide el paso al 95 por ciento de los medicamentos suministrados por vía oral o intravenosa. Por ello, los médicos que tratan a pacientes con enfermedades neurodegenerativas, como el párkinson, tienen que inyectar a menudo los medicamentos directamente en el cerebro. Se trata de una intervención agresiva que exige perforar el cráneo.

Algunos científicos han cosechado éxitos discretos para que los medicamentos suministrados por vía intravenosa atraviesen la barrera con ayuda de ultrasonidos o mediante la encapsulación dentro de nanopartículas. Por desgracia, estos métodos solo logran alcanzar pequeñas áreas del cerebro. Sin embargo, parece que ahora la solución se halla más cerca. La neurocientífica Viviana Gradinaru y sus colaboradores del Instituto Tecnológico de California han demostrado que un virus inocuo puede atravesar la barrera y administrar el tratamiento a todo el cerebro.

El equipo de Gradinaru se centró en los virus debido a su reducido tamaño y a su capacidad para introducirse en las células y secuestrar el ADN de estas. Poseen también envolturas proteicas, conocidas como cápsides, que pueden facilitar el suministro tanto de medicamentos como de terapias génicas. Para hallar el virus adecuado que penetrase en el cerebro, los investigadores desarrollaron millones de virus adenoasociados que diferían en el tipo de cápside. Posteriormente, inyectaron estas variantes en un ratón y, después de una semana, identificaron en el cerebro las cepas que habían logrado atravesar la barrera. Un virus AAV-PHP.B fue el que lo hizo de manera más eficaz.

Después, ensayaron si el AAV-PHP.B podía emplearse como posible vector para la terapia génica. Esta técnica se utiliza para tratar enfermedades al introducir genes nuevos en las células, o al sustituirlos o inactivarlos. Para ello, los científicos inyectaron en el torrente sanguíneo de un ratón un virus que transportaba los genes de proteínas verdes fluorescentes. Si el virus conseguía llegar al cerebro y el nuevo ADN se incorporaba a las neuronas se podría detectar fluorescencia verde en las disecciones del tejido. De hecho, los investigadores observaron que el virus se había infiltrado en la mayoría de las células cerebrales y que la señal fluorescente se mantuvo durante un año. Estos resultados fueron publicados recientemente en *Nature Biotechnology*.

En el futuro, este método podría emplearse para tratar una amplia gama de enfermedades neurológicas. «La capacidad de suministrar genes al cerebro sin métodos invasivos será extremadamente útil como herramienta de investigación y también tiene un potencial enorme en la medicina», comenta el neurólogo Anthony Zador, que se dedica a estudiar el funcionamiento del cerebro en el laboratorio Cold Spring Harbor. Gradinaru también piensa que el método podría servir para llegar a su vez a otras regiones distintas del cerebro, como el sistema nervioso periférico. La gran cantidad de nervios periféricos hace muy difícil el tratamiento del dolor de las neuropatías y un virus podría infiltrarse en todos ellos.

—*Monique Brouillette*

1



2



CONSERVACIÓN

Nadie quiere a los animales «feos»

Los biólogos prefieren estudiar las especies bien parecidas

¿Acapara el koala demasiada atención gracias a su dulce aspecto? Un nuevo estudio aporta datos cuantitativos a un debate actual sobre si las especies emblemáticas de la conservación reciben publicidad y fondos en perjuicio de otras que el común considera menos atractivas. Investigadores de las universidades Murdoch y Curtain, de Australia Occidental, han revisado a fondo 14.248 artículos, libros y actas de conferencias sobre 331 mamíferos de la fauna australiana y neozelandesa y han hallado un sesgo abrumador en contra del estudio de las especies «feas». El 73 por ciento de las publicaciones concernían a marsupiales, como el koala o los canguros. En cambio, los roedores y los murciélagos solo acapararon el 11 por ciento de la atención, pese a sumar el 45 por ciento de los integrantes de la lista.

Y para empeorar las cosas, buena parte de las investigaciones sobre esos animales poco estéticos es superficial: meras descripciones taxonómicas que se limitan a nombrar la especie y a describir su talla, asegura la autora principal Patricia Fleming. Desconocer el hábitat, las fuen-

THOMAS FUCHS (*virus*)



RATA canguro arenícola (*1*), rata de molares anchos (*2*) y murciélagos fantasma (*3*).

tes de alimento y el comportamiento dificulta su protección frente a los peligros que amenazan su supervivencia. Tales lagunas de información afectan a la fauna de muchos otros lugares, aparte de Australia, claro está. «Hay muchos taxones cosmopolitas, como los anfibios, cuya situación es aún peor y que han sido muy poco estudiados», alerta Simon Watt, fundador de la Sociedad para la Conservación de los Animales Feos. Estas especies pueden ser más importantes desde el punto de vista ecológico que aquellas que consideramos dignas de ser salvadas. Por ejemplo, los murciélagos ayudan a controlar las plagas de insectos que transmiten enfermedades o devastan los cultivos.

Fleming pretende hacer un llamamiento al estudio de animales más diversos, aunque reconoce que tal vez la financiación para investigar o salvar las especies de escaso atractivo sea siempre deficitaria. «El pastel a repartir es pequeño y siempre habrá excluidos», lamenta. En Australia, por ejemplo, la mayor parte del presupuesto federal asignado a la conservación va destinado a la lucha contra las especies invasoras. Y si bien la eliminación de los conejos introducidos desde Europa puede favorecer la flora autóctona australiana, no ayuda mucho a la rata canguro arenícola (*Notomys alexis*) o al murciélago fantasma (*Macroderma gigas*), ya no digamos al koala.

—John R. Platt

GETTY IMAGES (1–3)

ESPECIAL
MONOGRÁFICOS DIGITALES
Descubre la revista digital que reúne nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad
ESPECIAL Resistencia antibiótica
ESPECIAL Alzhéimer
ESPECIAL Relatividad general
ESPECIAL Neandertales
investigacionyciencia.es/revistas/especial
Prensa Científica, S.A.



TECNOLOGÍA

Un paso del Noroeste para Internet

La rápida desaparición del hielo ártico ha abierto la posibilidad de tender un cable submarino para acortar la conexión entre Asia y Europa

Hace más de un siglo, Roald Amundsen y los seis hombres de su tripulación navegaron por primera vez a través del gélido paso del Noroeste. Este mes, varios barcos mucho mayores que el de Amundsen volverán a recorrer esa ruta, aunque no por amor a la aventura. Su objetivo consistirá en comenzar a tender un cable submarino de fibra óptica que conecte Asia y Europa por el círculo polar ártico: hasta la fecha, el camino más corto posible para las señales de Internet que van de un continente a otro.

Por ahora, la mayor parte de los cables submarinos que conforman la espina dorsal de la World Wide Web conectan EE.UU. con Europa y Asia a través del Atlántico y el Pacífico. Sin embargo, el cambio climático y la pérdida acelerada de banquisa ártica durante los meses de verano han hecho factibles las rutas del norte. «Hoy es más viable que nunca [para las compañías] proponer estas rutas innovadoras», asegura Nicole Starosielski, investigadora de la Universidad de Nueva York experta en medios, cultura y comunicaciones y autora del libro *The undersea network* («La red submarina»), publicado en 2015.

Quintillion Networks, una compañía radicada en Anchorage, en Alaska, espera que su cable ofrezca por primera vez conexión de alta velocidad a localidades remotas de Alaska y Canadá. El cable, que debería reducir el retardo que experimentan las comunicaciones entre Londres y Tokio, podría también resultar ventajoso para los agentes bursátiles, interesados en que sus transacciones de pocos milisegundos de duración sufran la menor demora posible.

Muchas naciones verían con buenos ojos unas rutas de cable menos centradas en EE.UU. y la existencia de líneas de seguridad adicionales, ya que eso evitaría la vigilancia estadounidense y los fallos en la conexión. Consideraciones políticas y económicas semejantes han avivado el interés de varios países por financiar nuevos proyectos de cableado posiblemente más costosos. Con todo, solo el tiempo dirá si la ruta del Ártico y otros tramos submarinos reportarán beneficios a largo plazo.

—*Jeremy Hsu*

FUENTE: QUINTILLION NETWORKS; PITCH INTERACTIVE (*mapa*)

FRANCIA
Londres
REINO UNIDO
Mar de Barents
Mar de Noruega
ISLANDIA
Estrecho de Dinamarca
OCÉANO ATLÁNTICO
Bahía de Baffin
Estrecho de Davis
Mar del Labrador
Estrecho del Fury y el Hecla
Estrecho de Dease
Estrecho de Simpson
Bahía de Hudson
CANADÁ
ESTADOS UNIDOS

FASE 3
La última fase del proyecto extenderá el cable desde la bahía de Prudhoe, en Alaska, hasta el Reino Unido. Este segmento final atravesará el paso del Noroeste por los estrechos del territorio canadiense de Nunavut y cruzará después el océano Atlántico. Una vez concluido, el cable submarino permitirá que los datos de Internet viajen entre Europa y Asia a 30 teraoctetos por segundo.

FASE 3

En marzo, la banquisa ártica alcanzó su máxima extensión del año: **14.520.000 kilómetros cuadrados**, la menor registrada desde que los satélites empezaron a tomar datos a finales de 1978.

RIESGOS PARA LOS CABLES SUBMARINOS EXISTENTES

PESCA DE ARRASTRE
40 % de posibilidades de que rompa un cable*

ANCLAJES DE BARCOS
28 %

SUBSIDENCIAS O TERREMOTOS SUBMARINOS
8 %

FALLOS DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO
8 %

FALLOS DE LAS UNIDADES AMPLIFICADORAS O BIFURCADORAS
4 %

ABRASIÓN
(olas, lecho marino, hielo)
3 %

OTROS
(sabotaje, etc.)
9 %

*Las cifras de evaluación del riesgo corresponden a los peligros ordinarios que corren los cables en el Atlántico y el Pacífico. Durante buena parte del año, la extensa capa de hielo existente en el Ártico y los mares circundantes protegería el cableado de los barcos pesqueros.

GEOLOGÍA

Fallas rápidas

Si desea sentir cómo se mueve la Tierra bajo sus pies, visite Nueva Zelanda. Cada año, los lados de la falla alpina, que cruza la isla Sur, se desplazan en paralelo 30 milímetros uno con respecto al otro: una velocidad vertiginosa para las fallas de desgarre, que suelen moverse a una velocidad de uno o dos milímetros al año. «La falla alpina es especialmente interesante porque ha mantenido esa velocidad de deslizamiento durante casi toda su historia», explica Simon Lamb, geólogo de la Universidad Victoria de Wellington. «Hasta donde sé, ninguna otra falla terrestre se acerca a esta en ese aspecto.» Según un trabajo de Lamb publicado hace poco en *Geochemistry, Geophysiscs, Geosystems*, en los últimos 25 millones de años la falla alpina se ha deslizado unos 700 kilómetros, 250 más de lo que se pensaba hasta ahora. Ese movimiento trae consecuencias sísmicas: Nueva Zelanda tiene un 30 por ciento de posibilidades de sufrir un terremoto de magnitud 8 o mayor en los próximos 50 años.

—*Jennifer Hackett*

Las cinco fallas de desgarre más veloces del mundo

FALLA	LUGAR	LONGITUD (*km*)	RITMO DE DESLIZAMIENTO (*mm/año*)
Alpina	Isla Sur, Nueva Zelanda	700	30
San Andrés	California	1100	25
Septentrional de Anatolia	Turquía	1100	20
Denali	De la Columbia Británica a Alaska central	2000	10
Altyn Tagh	Tíbet	1500	9


La línea de nieve de los Alpes del Sur, en Nueva Zelanda, permite apreciar el recorrido de la falla alpina.

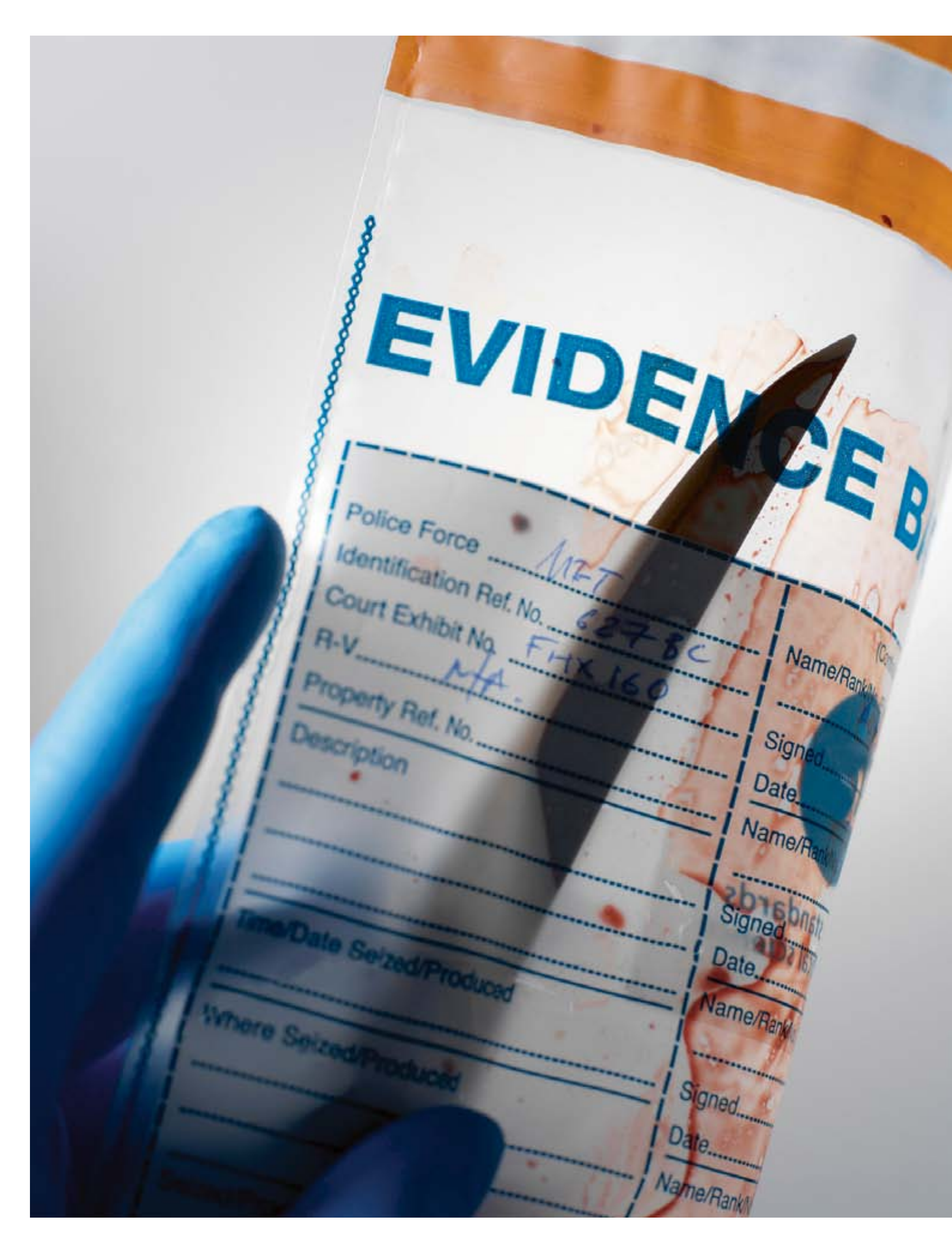
CORTESÍA DE JACQUES DESCLOITRES Y EQUIPO MODIS DE RESPUESTA RÁPIDA/NASA/CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES

CIENCIA FORENSE

Cuando el ADN señala al inocente

Igual que otros tipos de pruebas forenses, la del ADN no es infalible

En diciembre de 2012, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de ADN, un indigente llamado Lukis Anderson fue acusado del asesinato de Raveesh Kumra, un multimillonario de Silicon Valley. La acusación implicaba una posible sentencia de muerte. Pero Anderson no era culpable. Tenía una coartada sólida: ebrio y casi en coma etílico, había sido hospitalizado y estuvo bajo supervisión médica constante la noche del asesinato en noviembre. Más tarde, los abogados de Anderson supieron que su ADN había llegado a la escena del crimen por vía del equipo sanitario que atendió la llamada de Kumra en su domicilio. Habían tratado a Anderson previamente y, de forma inadvertida, esparcieron la muestra de ADN en la escena del crimen más de tres horas después. Este caso, que fue presentado en febrero en la reunión anual de la Academia Americana de Ciencias Forenses en Las Vegas, es uno de los ejemplos definitivos de cómo la transferencia del ADN puede involucrar a una persona inocente. Muchos opinan que basar el sistema criminal judicial en pruebas de ADN, a menudo consideradas infalibles, entraña riesgos importantes.



RAFE SWAN, ALAMY

Mientras que casi todos los campos de la medicina forense han sido revisados de modo exhaustivo en los últimos años, sobre todo aquellos basados en comparaciones, como las marcas de mordedura o el análisis microscópico de pelo, las pruebas de ADN han experimentado un auge, y con razón. Al estar basado en modelos estadísticos, el análisis de ADN es más definitivo y menos subjetivo que otras técnicas forenses. Se examinan regiones específicas, o locus, del genoma humano y así se evalúa la probabilidad de que una determinada muestra de ADN coincida o no con el perfil genético conocido de la víctima, el sospechoso o el presunto autor del crimen. Se puede incluso predecir cuán fuerte es la coincidencia contrastando la frecuencia con que aparecen ciertos patrones con bases de datos poblacionales. La organización sin ánimo de lucro Innocence Project, con sede en Nueva York, lleva analizando las muestras de ADN usadas como pruebas condenatorias en procesos judiciales desde mediados de los años noventa. Ha logrado casi 200 exoneraciones y ha promovido la demanda para reformar el sistema judicial criminal.

El ADN es, como cualquier otra prueba judicial, solo una parte del proceso. Según Erin E. Murphy, profesor de derecho en la Universidad de Nueva York y autor del libro *Inside the cell: The dark side of forensic DNA* («En el interior de la célula: el lado oscuro del ADN en criminología»), se suele confiar demasiado en que el ADN nos dará la solución, pero ello no siempre encaja en un sistema que sigue siendo defectuoso. Añade que, si no se muestra un mínimo de escepticismo y contención, los errores en la justicia están asegurados. Así, las muestras biológicas se pueden degradar o contaminar; los jueces y el jurado pueden malinterpretar las probabilidades estadísticas expuestas y, como en el caso de Anderson, las células cutáneas pueden ir a parar de un lugar a otro.

En 1997, los investigadores demostraron por primera vez que era posible obtener información genética de una

persona basada en las células cutáneas que dejaba en un objeto al tocarlo. El número de pruebas de este tipo, llamadas de ADN de contacto, que se recogen de superficies como empuñaduras de arma o picaportes han ido aumentando. (En algunas jurisdicciones, como el condado de Harris, en Texas, se triplicaron las muestras de ADN de contacto enviadas a analizar entre 2009 y 2013, a menudo con el fin de identificar posibles criminales involucrados en robos y asaltos.) Se están comercializando kits que generan un perfil genético completo de el cuchillo. Cale y sus colaboradores, junto con otros grupos de investigadores, intentan determinar cuán fácil y rápidamente se pueden transferir las células, y cuánto tiempo perduran. «Lo que hallamos es lo que es», comenta Cale, «pero lo importante es manejar y presentar esta información con cautela.»

Kelley Kulick, abogado del estado del condado de Santa Clara, postuló en la reunión forense de Las Vegas que el ADN de Anderson había sido transportado en los uniformes de los técnicos sanitarios. No se sabe cuántos casos de

Las muestras biológicas se pueden degradar o contaminar; los jueces y el jurado pueden malinterpretar las probabilidades estadísticas expuestas y, como en el caso de Anderson, las células cutáneas pueden ir a parar de un lugar a otro

una persona con tan solo entre tres y cinco células cutáneas. Las agencias del orden público los emplean, y también los laboratorios independientes y científicos que trabajan en proyectos de identificación de cadáveres.

Ese tipo de ADN se consideraba hasta hace poco una prueba irrefutable de contacto directo. Pero cada vez más estudios demuestran que el ADN no siempre es estático. Una investigación publicada en la revista *International Journal of Legal Medicine* expone que una persona, con tan solo coger un pañuelo que otra ha usado para limpiarse el cuello, puede transferir el ADN de esta última a un objeto que nunca ha tocado. Cynthia M. Cale, aspirante al máster en biología humana en la Universidad de Indianápolis, explicó en un artículo de la revista *Journal of Forensic Sciences* que una persona que utiliza un cuchillo de sierra tras haberle dado la mano a otra persona transfiere el ADN de esta al mango. De hecho, en una quinta parte de las muestras recogidas, la persona identificada como el contribuyente principal de ADN nunca había tocado trasferencia de ADN conducen a acusaciones erróneas. «No son frecuentes los casos obvios, pero es probable que sean más comunes de lo que imaginamos», afirma Jennifer Friedman, abogada del estado de Los Ángeles y especialista en ADN. «El problema radica en lo difícil que es demostrar que la transferencia haya ocurrido.»

La interpretación errónea del ADN de contacto de Anderson se ha convertido ahora en un aspecto polémico también para otros dos acusados en el caso del asesinato de Kumra, explica Kulick. Es indudable que las pruebas de ADN son una herramienta fundamental. Sin embargo, tanto los científicos forenses como los letrados insisten en que deberían considerarse otros factores adicionales que puedan corroborar la culpabilidad o inocencia de un acusado. Al igual que otros tipos de pruebas, el ADN solo es una pista circunstancial. En este sentido, el caso de Anderson sirve para alertar que un puñado de células cutáneas descarriadas no deberían significar demasiado.

—Peter Andrey Smith

AGENDA

CONFERENCIAS

27 de junio
El Colisionador Lineal Compacto (CLIC): Desafíos técnicos y detectores
Steinar Stapnes y Lucie Linssen, CERN
Ciclo sobre física de partículas
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es > agenda

EXPOSICIONES

Hasta el 26 de junio
Érase una vez... la informática: Del ábaco al *smart city* en viñetas y más
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

Fractales, las marismas y Doñana
Fundación Biodiversidad
Sevilla
www.magrama.gob.es > ceneam



HÉCTOR GARRIDO/FUNDACIÓN BIODIVERSIDAD *(exposición)*

OTROS

11 de junio - Charlas
Naukas Coruña Neurociencia
Sesiones divulgativas sobre neurociencia
Teatro Rosalía de Castro
La Coruña
naukas.com > eventos

15 de junio – Tertulia divulgativa
Las ondas gravitacionales
Roberto Emparan, Universidad de Barcelona
Asociación Cultural Casa Orlandai
Barcelona
www.cienciaensocietat.org > cafès científics

18 y 19 de junio - Jornadas
Fiesta de la Ciencia
Barcelona
barcelona.cat/barcelonaciencia

Del 27 de junio al 22 de julio – Actividades
Escuela de verano «Científicos del futuro»
Para niños de 5 a 12 años
Ciudad de las Artes y las Ciencias
Valencia
www.cac.es > museu > actividades

ASTROFÍSICA

Exoplanetas con materia oscura

Un estudio teórico predice la existencia de un nuevo tipo de astro: planetas ultradensos e inusualmente pequeños con materia oscura en su interior

LAURA TOLOS

Las observaciones astrofísicas y cosmológicas revelan que la mayor parte de la masa presente en el universo no se compone de partículas ordinarias, sino que debería aparecer como materia oscura: una forma hipotética de materia que no absorbe ni refleja luz. La presencia de esta enigmática sustancia podría inferirse a partir de los efectos gravitatorios que ejerce en la materia ordinaria que conforma los planetas, las estrellas y las galaxias. Sin embargo, su naturaleza sigue constituyendo una de las principales incógnitas a las que se enfrenta la física actual.

En las últimas décadas, la comunidad científica ha realizado un ingente esfuerzo para discernir la naturaleza de la materia oscura. Entre los métodos indirectos de búsqueda y análisis se encuentran aquellos que estudian los efectos de este tipo de materia en las propiedades y evolución de las enanas blancas y las estrellas de neutrones. Estos remanentes estelares son objetos extraordinariamente densos: aunque sus masas resultan similares a la del Sol, presentan radios equiparables al de la Tierra (en el caso de las enanas blancas) o de unos diez kilómetros (las estrellas de neutrones). Las primeras están formadas por átomos en estado de plasma, mientras que se cree que las segundas se componen en su mayor parte de neutrones.

En un trabajo publicado el pasado mes de diciembre en *Physical Review D*, Jürgen Schaffner-Bielich, investigador de la Universidad de Fráncfort, y la autora de este artículo propusimos la existencia de una nueva clase de objetos astronómicos: planetas compactos con materia oscura en su interior. Nuestro estudio demostró que tales astros podrían formarse y permanecer estables. Además, su detección, aunque difícil, podría llevarse a cabo mediante técnicas similares a las empleadas para buscar planetas fuera del sistema solar, los llamados exoplanetas. En caso de existir, el descubrimiento de estos objetos supondría un importante paso adelante en la carrera por entender la naturaleza de la materia oscura y su distribución en el universo.



¿UN NUEVO TIPO DE OBJETO ASTRONÓMICO? Un trabajo reciente ha demostrado la posibilidad de que existan planetas compactos formados por una mezcla de materia oscura y material de enanas blancas y de estrellas de neutrones. Esta recreación artística muestra un planeta con una masa similar a la de Júpiter perdido en la inmensidad del espacio.

NASA/LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO/CALTECH

Estructura y formación

Estos planetas compactos estarían integrados por una mezcla de materia oscura y material de enanas blancas y de estrellas de neutrones, ligados entre sí por medio de su atracción gravitatoria mutua. Tendrían masas similares a la de la Tierra o a la de Júpiter (de ahí el nombre de «planetas»), pero radios de pocas decenas o centenares de kilómetros; es decir, presentarían un tamaño muy inferior al de los exoplanetas conocidos. En principio, tales objetos podrían llegar a estar compuestos en buena parte por materia oscura, si bien en el caso de aquellos con masas similares a la de Júpiter la proporción de materia oscura podría bajar hasta el 1 por ciento.

Una vez demostrado que los astros con esas características podrían ser estables, el siguiente paso consistió en estudiar sus posibles mecanismos de formación. Tras un análisis inicial, descartamos que pudiesen crearse a partir de la acreción de materia oscura en enanas blancas o en estrellas de neutrones. Ello se debe a que, en general, los procesos de acreción que tienen lugar en estos remanentes estelares no bastan para acumular la cantidad de materia oscura necesaria para engendrar un planeta compacto y mantenerlo estable. Sin embargo, en principio sí podrían formarse a partir de la atracción gravitatoria ejercida sobre material estelar visible por aglomeraciones de materia oscura originadas tras la gran explosión que dio origen a nuestro universo.

La observación de planetas compactos con materia oscura en su interior supondría un gran desafío. El problema fundamental reside en su reducido tamaño, muy inferior al de los planetas conocidos hasta la fecha. Sin embargo, cabría esperar detectarlos mediante algunas de las técnicas empleadas para buscar exoplanetas.

En particular, varios programas de investigación internacionales, como el proyecto Objetos Compactos Masivos del Halo (MACHO, por sus siglas en inglés), el de Observaciones de Microlentes en Astrofísica (MOA), el Experimento de Lentes Gravitacionales Ópticas (OGLE) o el Experimento para la Investigación de Objetos Oscuros (EROS, por sus siglas francesas), han utilizado el efecto de lente gravitacional para detectar exoplanetas. Dicho efecto consiste en que una estrella cercana al planeta hace las veces de «lente», la cual enfoca y aumenta los rayos de luz de una estrella más lejana debido su intenso campo gravitatorio. La presencia del planeta amplificaría ligeramente esta señal, lo que permitiría su detección.

La cuestión subyacente es si, en un futuro cercano, la observación de astros con masa planetaria y radios inusualmente pequeños permitirá confirmar que se trata de planetas compactos con materia oscura o si, por el contrario, corresponden a otro tipo de objetos.

—Laura Tolos
Instituto de Ciencias del Espacio
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña-CSIC

PARA SABER MÁS

Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing. Colaboraciones MOA y OGLE en *Nature*, vol. 473, págs. 349–352, mayo de 2011. Disponible en **arxiv.org/abs/1105.3544**

Dark compact planets. Laura Tolos y Jürgen Schaffner-Bielich en *Physical Review D.*, vol. 92, art. 123002, diciembre de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1507.08197**

EN NUESTRO ARCHIVO

Lentes gravitatorias y materia oscura. Joachim Wambsganss en *IyC*, enero de 2002.

CAMBIO CLIMÁTICO

Redes tróficas reestructuradas

El cambio climático está provocando la llegada de peces de gran talla a los ambientes marinos del Ártico, un hecho que puede alterar las redes tróficas y la biodiversidad de esa región

JULIA L. BLANCHARD

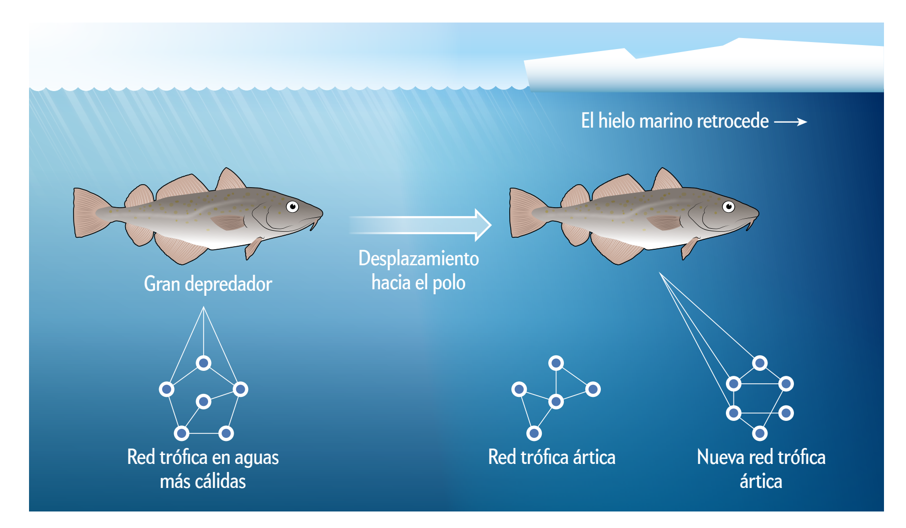
El cambio climático está alterando la distribución tanto de especies terrestres como marinas. Para aquellas propias de ambientes extremos, como los polos o los situados a altitudes elevadas, pronto no existirán lugares a los que retirarse. Las consecuencias de la redistribución de las especies en el funcionamiento de los ecosistemas es algo de lo que se habla a menudo pero de lo que, en realidad, se sabe muy poco. En parte, esta ignorancia se debe a la necesidad de manejar una gran cantidad de información para comprender las complejas redes de interacciones ecológicas que forman los organismos y sus cambiantes hábitats. En un trabajo publicado en *Proceedings of the Royal Society B*, Susanne Kortsch, de la Universidad de Tromsø-Universidad del Ártico de Noruega, y sus colaboradores combinan el análisis de sistemas complejos con datos sobre la distribución de especies a gran escala y con la descripción detallada de las interacciones tróficas en el mar de Barents, situado entre Noruega y Rusia. Los autores utilizan toda esta información para demostrar cómo la redistribución de aquellas especies de peces que responden con mayor rapidez al cambio climático puede alterar de forma sustancial la estructura de las redes tróficas marinas del Ártico.

Unas aguas más cálidas implican que, en el hemisferio boreal, algunas especies de origen más meridional se estén desplazando hacia el norte y, durante este periplo, se estén estableciendo nuevas interacciones ecológicas. ¿Llevarán estos cambios a la extinción de ciertas especies y a la dominancia de otras en el ecosistema? Si bien aún no podemos responder a esta pregunta, conocer la naturaleza de las interacciones entre las especies y prever el modo en que cambiarán puede ayudarnos a saber cómo mitigar la pérdida de biodiversidad antes de que sea demasiado tarde.

El análisis de sistemas complejos ha contribuido a determinar la rapidez con que se propaga una enfermedad, el modo en que se difunde la información en Internet y el funcionamiento del tráfico, del comercio e incluso de las señales bioquímicas. Las redes tróficas son sistemas complejos de interacciones entre depredadores y presas que han fascinado a los científicos durante más de un siglo. La estructura de la red trófica, esto es, el modo en que se establecen las interacciones entre especies, puede influir en la estabilidad de la propia red. Tal estructura puede describirse mediante diversos parámetros, como el número de interacciones, o conexiones, que mantiene cada especie con las demás, la intensidad y densidad de dichas conexiones, la existencia de subconjuntos de la red organizados en módulos y la presencia de bucles dentro de la red. Estos parámetros han recibido atención porque pueden influir sobre múltiples características del ecosistema, tales como las extinciones encadenadas de varias especies en respuesta a la desaparición de otras o la velocidad a la que se difunden las perturbaciones por la red.

La llegada de grandes depredadores

El análisis de las redes tróficas marinas árticas realizado por Kortsch y sus colaboradores revela que estas constan de pocas conexiones y son bastante modulares, dos características asociadas a una gran estabilidad y resiliencia ante las perturbaciones. Se trata de redes situadas en regiones cubiertas la mayor parte del año por los hielos marinos. En ellas predominan los organismos bentónicos, que viven cerca del fondo marino, o directamente sobre él, y cuyo alimento procede de las diminutas algas (fitoplancton) que suelen quedar



LAS REDES TRÓFICAS ÁRTICAS están cambiando. Estas suelen constar de un menor número de conexiones que las de ecosistemas situados más al sur, donde los grandes depredadores consumen organismos de tallas muy variadas y explotan diferentes hábitats. Pero, con el cambio climático y el retroceso del hielo, estos grandes peces están empezando a desplazarse hacia los ambientes árticos. Allí están alterando la estructura de la red trófica, al introducir en ella nuevas interacciones y al reducir su modularidad.

atrapadas en el hielo marino. Esta ruta bentónica ha sido descrita como de baja velocidad y es relativamente resiliente a cambios repentinos.

Por el contrario, en la región subártica libre de hielo, situada más al sur, las redes tróficas constan de un mayor número de interacciones, en las que participan los peces de gran tamaño. Estos tienen extensas áreas de campeo, se hallan presentes todo el año y muestran una alimentación generalista, es decir, son poco selectivos a la hora de escoger sus presas. En parte debido a su tamaño, tales especies actúan como superconectores y disponen de un amplio espectro de presas de las que se alimentan. Consumen especies de tamaños muy diversos, no solo de la zona bentónica, sino también de toda la columna de agua, es decir, la zona pelágica. De este modo, estos peces de gran tamaño controlan a las poblaciones de depredadores de menor tamaño y a las de herbívoros.

¿Cómo responderán las redes tróficas árticas si esas especies generalistas se desplazan hacia el norte? Cuatro de ellas lo están haciendo con rapidez: el bacalao (*Gadus morhua*), el eglefino (*Melanogrammus aeglefinus*) y dos especies de gallineta (*Sebastes norvegicus* y *Sebastes mentella*). A partir del conocimiento de sus dietas y de información geográfica detallada sobre su distribución actual, Korstch y sus colaboradores han incorporado estas especies y sus interacciones a la red trófica ártica y han identificado un cambio en la estructura de esta.

El resultado no ha sorprendido mucho. En comparación con la red original, la modificada contiene más conexiones y menor modularidad, lo que la asemeja a las redes tróficas más meridionales. La sorpresa surge al considerar la propagación en el tiempo de dichas alteraciones en todo el ecosistema. La estructura de la red trófica por sí sola no nos permite predecir cambios en la abundancia de especies, pero proporciona una guía para investigar cómo pueden extenderse estos a lo largo del circuito. Por ejemplo, la existencia de bucles en las redes puede provocar resultados inesperados y contradictorios. La red ártica original no tenía bucles, pero la nueva sí.

Prever el efecto de dichos cambios en el ecosistema no resulta sencillo. Con una menor modularidad y más interacciones asociadas a generalistas de gran talla, la nueva red puede volverse más vulnerable a las perturbaciones, porque estas se propagan con mayor rapidez, o bien más robusta, gracias al papel regulador de los depredadores. El resultado también depende de la causa de la perturbación y de las características de los individuos presentes, como el tamaño corporal o su fisiología.

A medida que el hielo retrocede, actividades humanas como la pesca o la explotación petrolífera pueden verse facilitadas. Las especies que se están desplazando no solo son generalistas de gran talla; además, tienen importancia comercial. Las interacciones tróficas constituyen la base de los modelos que suelen emplearse para evaluar el impacto de las actividades económicas en el ecosistema o en las especies no afectadas directamente. Sin embargo, se tiende a suponer que las conexiones tróficas permanecen estables. El estudio de Korstch se suma a las crecientes pruebas de que esto no es así, pues las relaciones tróficas varían con el tiempo.

El cambio climático está provocando otras alteraciones ecológicas. Las transiciones repentinas, conocidas como cambios de régimen, están afectando al equilibrio entre macroalgas e invertebrados en la misma región, con lo que se repiten las tendencias observadas con anterioridad a escala global. Dado lo inevitable del cambio en estos ecosistemas potencialmente vulnerables, necesitamos una mejor comprensión de los aspectos dinámicos de esta reorganización de la red trófica según es afectada por factores de estrés diversos. Este mayor conocimiento debe integrarse con evaluaciones sucesivas de los impactos que sufre el ecosistema, con el fin de minimizar los daños futuros que el cambio climático y las actividades humanas pueden causar a la biodiversidad.

—Julia L. Blanchard
Instituto de Investigaciones Marinas y Antárticas
Universidad de Tasmania en Hobart

Artículo original publicado en *Nature* 527, págs. 173-174, 2015.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Food webs: Reconciling the structure and function of biodiversity. Ross M. Thompson et al. en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 27, págs. 689-697, diciembre de 2012.
Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic. Maria Fossheim et al. en *Nature Climate Change*, vol. 5, págs. 673-677, mayo de 2015.
Climate change alters the structure of arctic marine food webs due to poleward shifts of boreal generalists. Susanne Kortsch et al. en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 282, 20151546, septiembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Redes tróficas marinas. Enrico L. Rezende, Eva M. Albert y Miguel A. Fortuna en *IyC*, agosto de 2011.
Ecosistemas al borde del colapso. Carl Zimmer en *IyC*, diciembre de 2012.
Las matemáticas de la biodiversidad. Jordi Bascompte en *IyC*, octubre de 2013.

© NATURE

CÁNCER

Detener la metástasis

El conocimiento de los mecanismos de propagación de un tumor, entre ellos la segregación de unas vesículas denominadas exosomas, ayudaría a desarrollar tratamientos más específicos contra la enfermedad

HÉCTOR PEINADO

Más del 90 por ciento de las muertes relacionadas con el cáncer se producen a causa de un proceso conocido como metástasis, palabra derivada del griego μετάστασις, que significa «cambio de lugar». El fenómeno se caracteriza por la diseminación de células del tumor primario en el organismo. Una vez producida, la metástasis resulta muy difícil de controlar y solo puede tratarse en estadios muy tempranos y localizados. De ahí que sea crucial la detección precoz del cáncer y una concienciación social de acudir a revisiones médicas a la más mínima sospecha de alguna malignidad.

Pero ¿qué mecanismos usa el cáncer para extenderse por nuestro organismo? ¿Hasta qué punto representa la metástasis una estrategia de supervivencia del tumor, una consecuencia de la selección natural de ciertas células tumorales? Obtener una respuesta a estas preguntas puede orientarnos en la búsqueda de tratamientos que nos permitan evitar la propagación del cáncer, el principal factor de mortalidad.

En un trabajo publicado en *Nature* el pasado octubre por un equipo internacional de investigadores y en el que participó nuestro grupo, describimos un nuevo mecanismo que contribuye a la formación de metástasis en órganos concretos. Si lográramos frenarlo mediante terapias específicas, tal vez conseguiríamos mantener el cáncer bajo control y que se convirtiera en una enfermedad crónica.

Preparar el terreno

Se sabe que ciertos tipos tumorales tienden a producir metástasis en determinados órganos, proceso que se denomina organotropismo metastásico. De este modo, los tumores de mama metastatizan sobre todo en el pulmón, hígado, cerebro y hueso, mientras que los de páncreas lo hacen primordialmente en el hígado. Entender por qué un tumor genera metástasis en unos órganos y no en otros es una de las mayores incógnitas de la oncología actual, y también una de las más antiguas. Hace 126 años, el médico británico Stephen Paget formuló su teoría «de la semilla y el sustrato», que defiende que la metástasis necesita células tumorales —«las semillas»— que se dispersen, pero, además, un ambiente acogedor —«el sustrato fértil»— en el órgano de destino.

Diversos estudios han determinado que existen genes asociados con el riesgo de metástasis en ciertos órganos. Sin embargo, ¿qué papel desempeña el microambiente tumoral (su entorno) en la metástasis? ¿Podríamos evitarla mediante la modificación de ese entorno? Para ello, deberíamos entender el mecanismo de la metástasis en su totalidad y determinar las señales que la favorecen para anularlas o, por lo menos, frenarlas.

En nuestro trabajo publicado en *Nature* hemos descubierto que el tumor primario segrega unas vesículas nanométricas, denominadas exosomas, que permiten crear en tales órganos un microambiente favorable para el desarrollo de las células cancerosas. A modo de emisarios tumorales, los exosomas circulan en el organismo y preparan nichos fértiles, denominados nichos premetastásicos, que propiciarán la metástasis.

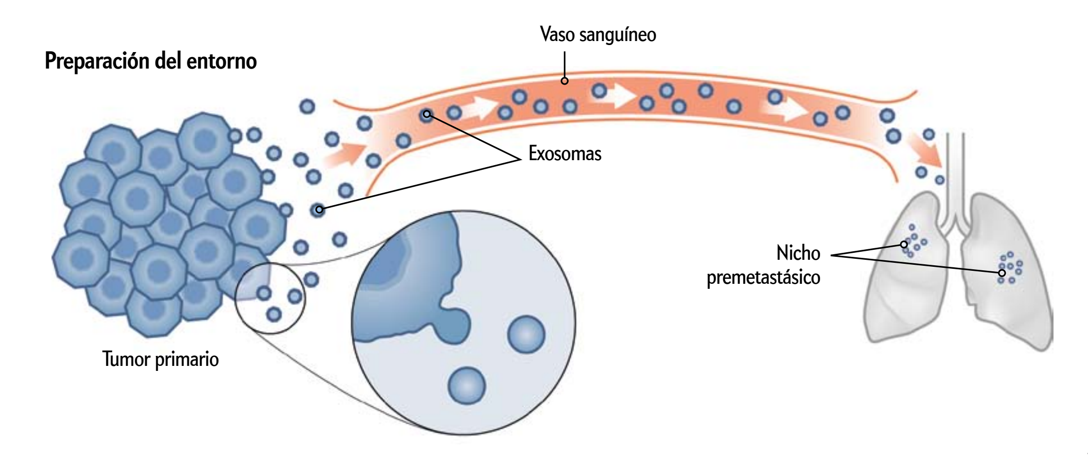
Sin embargo, se desconoce lo que determina que se formen nichos en unos órganos y no en otros. Las investigaciones que hemos llevado a cabo indican que los exosomas llevan, a modo de «códigos postales», unas moléculas en su superficie, denominadas integrinas, que los hacen detenerse en unos órganos concretos, según la composición de su matriz extracelular (el medio donde se hallan inmersas las células). El anidamiento de exosomas en tales órganos promueve en ellos señales proinflamatorias que actúan como «fertilizante». Este nuevo mecanismo se une al resto de las estrategias que tiene el tumor para perpetuarse. Con ellas parece otorgar a algunas de sus células una ventaja adaptativa para que puedan sobrevivir y producir metástasis.

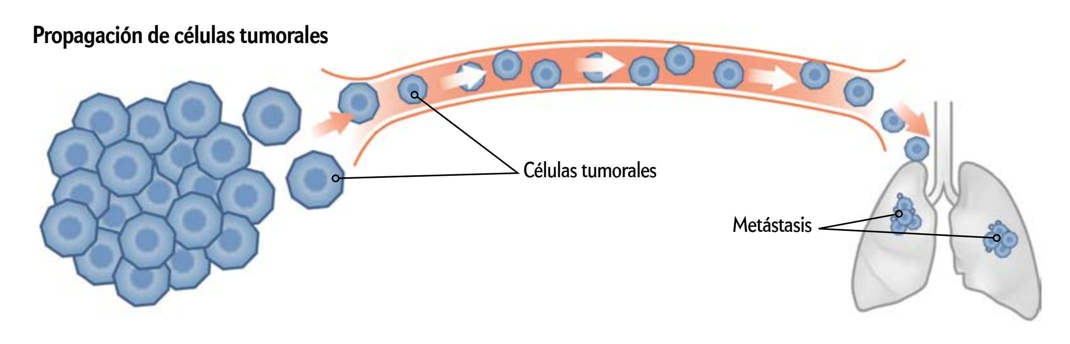
Células seleccionadas

La capacidad adaptativa de las células tumorales tal vez sea una de las características más relevantes del proceso metastásico. Darwin planteó en su teoría de la evolución que solo aquellos individuos con ciertas características que les permiten adaptarse a un nuevo ambiente logran sobrevivir y ser seleccionados por la naturaleza. Esta máxima en biología parece aplicable a la metástasis. Numerosos estudios, entre otros los del prestigioso científico Joan Massagué, director del Instituto Sloan-Kettering de Nueva York, demuestran que existe una evolución y selección génica del fenotipo de las células tumorales, una élite de células capaces de sobrevivir a todas las fases del proceso tumoral.

De este modo, algunas células, aparte de adquirir mutaciones y otros cambios genéticos y epigenéticos, tienen la capacidad de escaparse del tumor primario. Igual que el protagonista de la película *La gran evasión* (Steve McQueen), estas células adquieren tres características básicas que les permiten sobrevivir. En primer lugar, mediante mecanismos inmunodepresores evaden a «los centinelas», nuestras células del sistema inmunitario, que de otro modo las eliminarían. En segundo lugar, modifican el microambiente tumoral local al cavar «túneles» a su alrededor, en un proceso denominado remodelación de la matriz extracelular. Y, por último, después de haberse escapado por ellos, consiguen sobrevivir en un nuevo entorno hostil y vigilado, nuestro organismo, lo que da lugar a la extravasación final (salida de las células desde un vaso sanguíneo hacia un tejido) y a la metástasis. Tras adquirir todas estas propiedades, a cada cual más compleja, la célula se ha convertido en una célula tumoral especializada en la labor de metastatizar.

Los estudios fundamentales realizados por Isaiah J. Fidler, del Centro Oncológico MD Anderson en la Universidad de Texas, han demostrado que la metástasis, pese a todo ese proceso selectivo, resulta altamente ineficiente. De hecho, tan solo un 0,01 por ciento de las células que han logrado escaparse del tumor llegan a metastatizar, y solo lo hacen en los ambientes favorables, en esos sustratos fértiles que el tumor ha ido preparando para asegurar su persistencia. Sin embargo, pese a su





DEL TUMOR AL RESTO DEL CUERPO: En la metástasis se ha observado que, en una primera fase (*arriba*), las células del tumor primario segregan unas vesículas, denominadas exosomas, que recorren la circulación sanguínea y se instalan en órganos distantes, como los pulmones. Allí preparan un entorno favorable, donde, en una segunda fase (*abajo*), acogerán a las escasas células que han logrado escaparse del tumor primario y sobrevivir al ataque del sistema inmunitario.

alta ineficiencia, constituye el fenómeno más letal del cáncer.

Objetivo: controlar la metástasis

Ante el reto de evitar o frenar la metástasis, las cuestiones principales que se plantean son cómo detener las células cancerosas seleccionadas para propagarse a otros órganos y cómo convertir los nichos premetastásicos en entornos adversos para el desarrollo del tumor.

La mayoría de los tratamientos actuales están centrados en nuestro conocimiento de la biología del cáncer. Se ha avanzado mucho en este campo, en particular en determinar los mecanismos moleculares implicados en su aparición (mutaciones o inestabilidad cromosómica) y en la aplicación de terapias sistémicas para destruir los tumores, como la radioterapia y la quimioterapia. Desgraciadamente, la mayoría de esas estrategias generan resistencias: por muy específico que sea un fármaco, el tumor reacciona y aprende a hacerle frente con cada administración.

En la actualidad, una de las intervenciones que mejores resultados está dando es la inmunoterapia [*véase* «Las defensas contra el cáncer», por Karen Weintraub *en este mismo número*]. Cuando se reactiva el sistema inmunitario, se ha visto que tumores letales como el melanoma y el cáncer de pulmón parecen remitir. Ahora mismo existen pacientes de melanoma con enfermedad metastásica controlada gracias a esta táctica, un logro impensable hace solo unos años. Pero el tumor cuenta también con sus propias armas inmunodepresoras. Aparte de producir ciertos factores solubles con este efecto, segrega a su alrededor exosomas que funcionan como un escudo protector en el microentorno tumoral.

Cabe preguntarse entonces cuál es el talón de Aquiles de la metástasis. Es difícil vislumbrar una terapia efectiva ahora mismo; sin duda hacen falta más investigaciones para entender la complejidad de este proceso. Mi buen colega Cyrus Ghajar, del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson, en Seattle, sugería en una revisión reciente aplicar las estrategias que se usan hoy contra el VIH para evitar las metástasis. Una gran parte de la efectividad de estas estriba en su capacidad no tanto de destruir el virus, sino de controlarlo: persiguen mantenerlo en un estado silente para cronificar la enfermedad.

¿Podríamos lograr que el cáncer y las metástasis se volvieran también crónicos? Las nuevas teorías que indagan en este campo plantean la manipulación de los nichos metastásicos para que las metástasis no puedan prosperar. Estas podrían cronificarse si nuestro sistema inmunitario las mantuviera bajo control. Tal vez sea el momento de aceptar que el objetivo principal quizá no consista en acabar con el cáncer mediante terapias sistémicas, sino en desarrollar estrategias más específicas que nos permitan convivir con él.

—Héctor Peinado
Jefe del Grupo de Microambiente y Metástasis
Programa de Oncología Molecular
Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas, Madrid

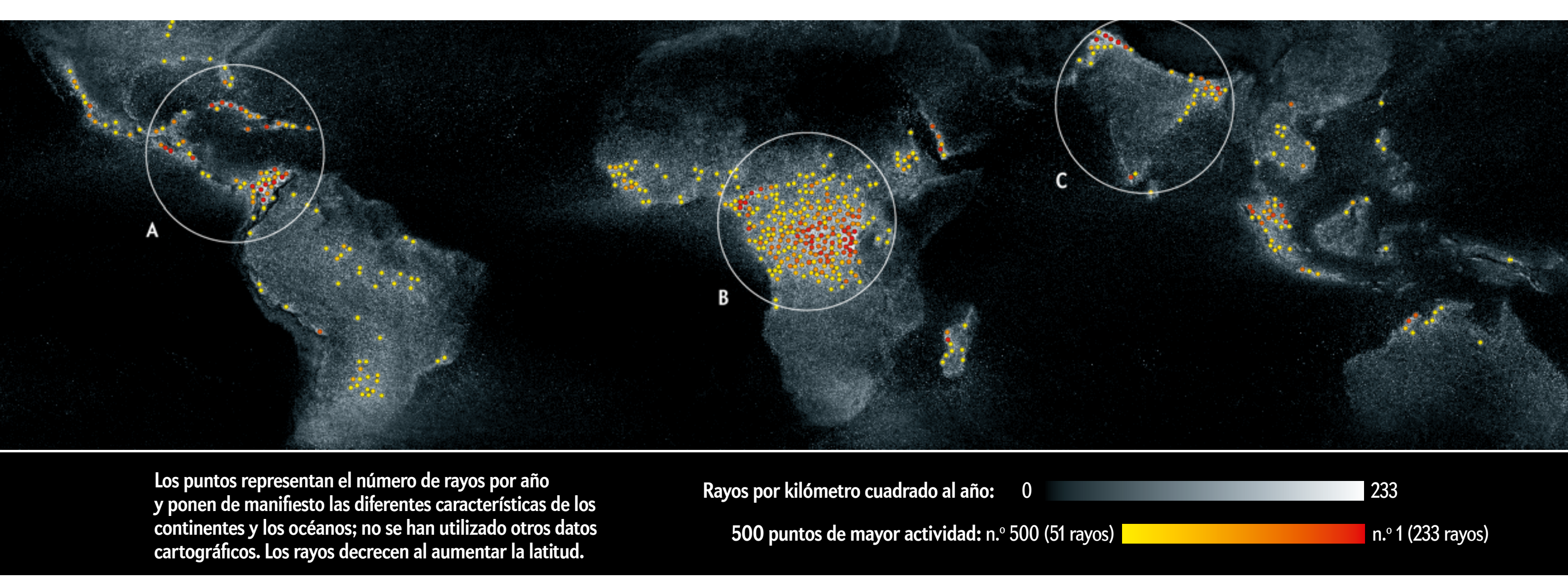
PARA SABER MÁS

Metastasis prevention by targeting the dormant niche. C. M. Ghajar en *Nature Reviews Cancer*, vol. 15, n.º 4, págs. 238-247, abril de 2015.
Surviving at a distance: Organ specific metastasis. A. C. Obenauf y J. Massagué en *Trends in Cancer*, vol. 1, n.º 1, págs. 76-91, septiembre de 2015.
Tumour exosome integrins determine organotropic metastasis. A. Hoshino et al. en *Nature*, vol. 527, n.º 7578, págs. 329-335, octubre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Comprender el cáncer. *Temas* de *IyC* n.º 79, enero/marzo de 2015.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



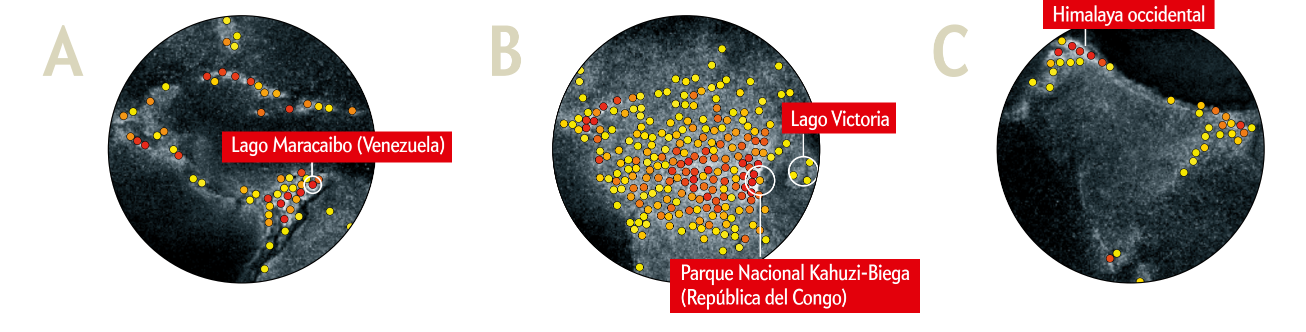
METEOROLOGÍA

¿Dónde caen más rayos?

El epicentro se halla en África Central, pero un lago sudamericano encabeza la lista

Sobre el lago venezolano de Maracaibo se generan rayos 297 días al año, una frecuencia asombrosa que supera a la de cualquier otro punto de la Tierra. El segundo lugar lo ocupa el Parque Nacional Kahuzi-Biega, en la República Democrática del Congo. Un reciente análisis de datos recogidos por satélite a lo largo de 16 años demuestra que los rayos nube-tierra y nube-nube ocurren con mayor frecuencia sobre un terreno accidentado, principalmente en las faldas de regiones montañosas abruptas y, en particular, si en las proximidades existe un lago de aguas cálidas (*círculos inferiores*).

Paradójicamente, el lugar de mayor frecuencia en EE.UU. se halla cerca de Orangetree, en Florida, en un extremo de las llanuras Everglades, aunque ocupa el puesto 122 en la clasificación mundial. África aloja la mayoría de los puntos más activos del planeta —283 de los 500 que encabezan la lista—, seguida de Asia (con 87), Sudamérica, Norteamérica y Australia (*puntos coloreados en el mapa superior*). Las tormentas eléctricas en terreno continental son más frecuentes durante la tarde, mientras que en los océanos su número es menor y tienden a desatarse de noche. —*Mark Fischetti*



Continente americano

El extremo norte del lago Maracaibo (*arriba*) encabeza la clasificación mundial de caída de rayos. Allí el aire caliente y húmedo que asciende desde el lago y el golfo de Venezuela se mezcla con las brisas oceánicas y los vientos encauzados por la convergente cordillera andina. La mezcla estalla en forma de tormenta eléctrica 297 noches al año. Seis de los otros diez lugares de mayor actividad en Sudamérica se encuentran en los valles y las faldas de los Andes.

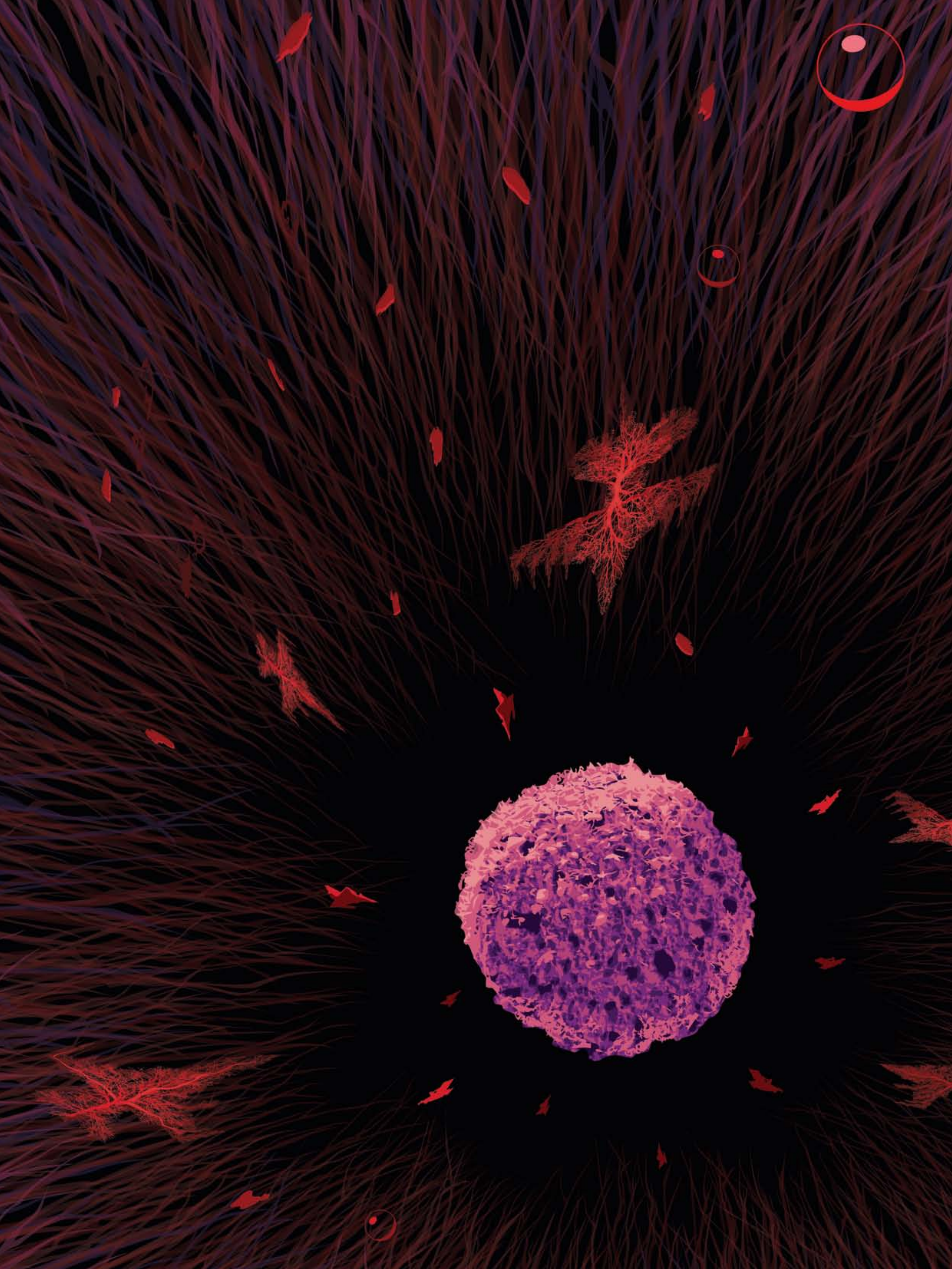
África Central

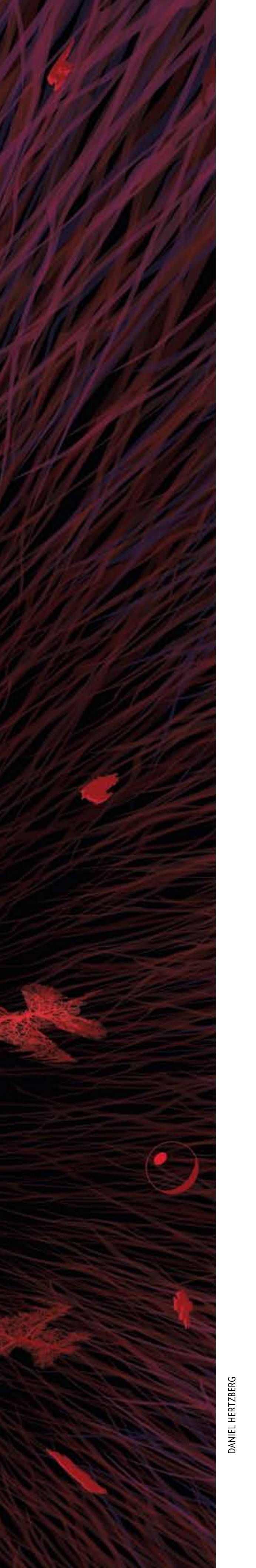
Ocho de los diez puntos más activos de África se hallan en la República Democrática del Congo. Ello se atribuye en parte a que allí la elevada humedad de la selva se mezcla con unas intensas corrientes verticales de aire y se crean unas condiciones de «convección explosiva». Veinticuatro de los 30 puntos donde se registran más rayos en el continente presentan una orografía montañosa; el lago Victoria, próximo a las montañas Mitumba, es un hervidero de tormentas nocturnas.

Subcontinente indio

En las regiones monzónicas la actividad alcanza su punto álgido en primavera, antes del azote de las copiosas lluvias, y presenta un segundo máximo entre agosto y octubre, cuando estas amainan. Las descargas ocurren con mayor frecuencia a lo largo del Himalaya occidental, donde la humedad y los vientos oceánicos ascendentes se mezclan con el aire seco que desciende de las mesetas afgana y tibetana.

FUENTE: «WHERE ARE THE LIGHTNING HOTSPOTS ON EARTH?» POR RACHEL I. ALBRECHT ET AL., EN *BULLETIN OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, PUBLICADO EN LÍNEA EL 17 DE FEBRERO DE 2016; PITCH INTERACTIVE (*ilustraciones*)





DANIEL HERTZBERG

MEDICINA

LAS DEFENSAS CONTRA EL CÁNCER

La estimulación del sistema inmunitario está dando resultados prometedores en la lucha contra el cáncer

Karen Weintraub

EN SÍNTESIS

Una nueva generación de tratamientos refuerza la capacidad del sistema inmunitario para combatir las células cancerosas y ha logrado resultados notables en los últimos cinco años.

Miles de personas afectadas por cáncer avanzado de pulmón o de piel, o por diversos tipos de leucemia y linfoma, han sido tratadas y muchas parecen haberse curado.

Los investigadores desarrollan nuevos medicamentos y combinaciones que en los próximos años podrían devenir en tratamientos más seguros y eficaces que los actuales.

Karen Weintraub es periodista especializada en salud y ciencia y escribe para ***STAT*** (www.statnews.com), *USA Today* y *The New York Times*, entre otras publicaciones.



Si a Michelle Boyer le hubieran diagnosticado el cáncer de piel avanzado que padece en 2010 y no en 2013, seguramente no seguiría con vida. El melanoma, el tumor cutáneo más mortífero, se había extendido desde un lunar de la espalda a sus pulmones, y sabía que el pronóstico era poco halagüeño. Pero a partir de mayo de 2013, esta joven de Seattle de 29 años comenzó a recibir una serie de tratamientos innovadores, algunos disponibles solo desde dos años antes, que empujaron a su sistema inmunitario a reconocer, atacar y reducir los tumores. Hoy todavía no está curada y las inmunoterapias han minado su salud, pero agradece estar viva y espera que la actual tanda de tratamiento, o la siguiente, consigan los resultados milagrosos de los que otros pacientes hablan en Internet. «Así es mi vida en este momento. La gente opina que en mis circunstancias es difícil ser optimista, pero para mí es normal, no supone tanto esfuerzo como puede parecer», confiesa.

Karen Koehler, de 59 años, profesora jubilada de educación especial en Park Ridge, en Nueva Jersey, parece haber sido agraciada con el milagro de la inmunoterapia en su primer intento. A principios de 2015 le informaron de que aparentemente estaba curada de otro tipo de cáncer, en su caso la leucemia. El tratamiento, de apenas un par de horas, consistió en una única inyección de algunas de sus propias células inmunitarias genéticamente modificadas para combatir con mayor eficacia las células cancerosas. Con todo, no ha sido un camino de rosas: tras la administración permaneció varios días en cuidados intensivos porque su sistema inmunitario se desbocó, un contratiempo que la mantuvo hospitalizada varias semanas. Aun así, el tratamiento resultó eficaz, pues un mes después las imágenes no hallaron rastro del cáncer en su cuerpo.

Michelle y Karen son dos de los miles de enfermos que han recibido varias clases de inmunoterapia en el último lustro. Sus vivencias ilustran el reto de esta novedosa estrategia contra el cáncer. Un tratamiento que, en lugar de exponer el cuerpo a sustancias químicas tóxicas o la radiación para acabar con las células cancerosas, vigoriza esas células complejas y altamente interactivas y manda señales de alarma moleculares para que las propias defensas del organismo ejecuten esa misión desde dentro. Los resultados hasta ahora han sido alentadores. La inmunoterapia se está convirtiendo a marchas forzadas en una estrategia fundamental contra algunos tipos de cáncer, junto con la cirugía, la radioterapia y la quimioterapia.

En el curso de los ensayos clínicos con una nueva inmunoterapia dirigida contra un tipo muy agresivo de leucemia, el 90 por ciento de los pacientes experimentó una remisión completa. Los médicos no hallaron en ellos rastro alguno de la enfermedad. Y si bien algunos acabarán sufriendo recaídas, para muchos otros la respuesta al tratamiento parece ser la cura permanente. En otros ensayos, más de la mitad de los participantes tratados con la inmunoterapia a causa de un melanoma avanzado pueden ahora contar en años y no en meses su esperanza de vida. «La inmunoterapia está cambiando el paradigma de nuestra manera de tratar el cáncer», afirma Gary Gilliland, presidente y director del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson, en Seattle.

Forzoso es reconocer que aún es demasiado pronto. Los pocos años en que se ha aumentado la esperanza de vida para ciertos tipos de cáncer significa que aún hay pacientes que mueren. Por ello, el estudio de estrategias destinadas a potenciar la respuesta inmunitaria no cesa: vacunas, virus, células genéticamente modificadas, fármacos, etcétera. También se comienzan a combinar los tratamientos con el fin de mejorar su eficacia y, si es posible, reducir los efectos secundarios. Pero ya nadie duda de la posibilidad de emplear el sistema inmunitario para vencer al cáncer, al menos por algún tiempo. «Presenciamos el final del principio de la historia de la inmunoterapia», apostilla Eric Rubin, vicepresidente de oncología clínica en los laboratorios de investigación de Merck.

ÉXITO LÍQUIDO

El sueño de combatir el cáncer por medio del sistema inmunitario se remonta al menos 125 años, cuando el médico neoyorquino William Coley inyectó bacterias a algunos pacientes con el propósito de potenciar la energía curativa natural del cuerpo. El experimento de Coley fue secundado por otros doctores, pero cayó en el olvido gradualmente tras su muerte en 1936. Fue desbancado por los avances en la quimioterapia y los tratamientos con hormonas y anticuerpos, cuyos resultados eran más uniformes y beneficiaban a un mayor número de enfermos.

Pese a todo, la idea de estimular el sistema inmunitario nunca ha perdido del todo su vigencia, un mérito atribuible en parte al Instituto de Investigación del Cáncer, una entidad filantrópica neoyorquina fundada en 1953 por la hija de Coley. En las últimas décadas, gracias a la biología molecular el conocimiento acerca del funcionamiento y los errores del sistema inmunitario ha progresado, lo cual ha permitido a los especialistas en oncología renovar su arsenal con armas inmunológicas más potentes.

Entre las dianas más atrayentes destacan ciertos tipos de cáncer del aparato circulatorio y linfático, como la leucemia y el linfoma. Estas neoplasias surgen cuando diversos tipos de células madre (hemocitoblastos) que engendran los glóbulos rojos y blancos de la sangre (entre otros tejidos), mutan y crecen sin control desplazando a las células sanas y usurpando sus funciones vitales. Muchos de esos tumores «líquidos» aparecen a raíz de alteraciones en un componente del sistema inmunitario: los linfocitos B. En circunstancias normales, ese tipo de linfocitos genera anticuerpos contra las bacterias y los virus y, en concurso con los linfocitos T, ayuda a coordinar otras respuestas inmunitarias. Pero cuando se tornan cancerosos, destruyen el cuerpo desde el interior.

A finales del siglo pasado se desarrolló el equivalente biológico de un misil teledirigido que reconoce la proteína CD20, presente en la superficie del linfocito B en un momento concreto,

hacia el final de su existencia. El rituximab es un anticuerpo monoclonal que incita a los linfocitos T a hacer algo inusual: atacar y destruir los linfocitos B maduros portadores de CD20.

El problema es que la proteína CD20 no es un marcador específico del cáncer. La exhiben tanto los linfocitos B normales como los cancerosos, por lo que el tratamiento los mata sin distinción. La mayoría de la gente puede vivir sin linfocitos B. (Ello no ocurre con los de tipo T, como demuestra el gran número de muertes causadas por la infección del virus del sida, cuya diana es precisamente ese último tipo.) Una vez que el fármaco desaparecía del cuerpo, la mayoría de pacientes comenzaba a producir nuevos linfocitos B a partir de las células madre de la médula ósea. Los ensayos clínicos en los años noventa demostraron que la combinación de la quimioterapia con el rituximab era particularmente eficaz contra los tumores causados por los linfocitos B.

La leucemia de Karen la motivó una mutación de los linfocitos B, pero el rituximab le causaba graves efectos secundarios y no acababa de ser plenamente eficaz, por lo que decidió dejarlo. Además, diversas pruebas indicaban que su cáncer era resistente a la quimioterapia convencional. Puesto que la enfermedad empeoraba a ojos vista, los médicos le ofrecieron un tratamiento inmunitario experimental concebido contra su leucemia, y aceptó.

El objetivo de la nueva terapia era destruir todos los linfocitos B de su organismo, al igual que el rituximab, pero con dos



FOTOGRAFÍA DE ANNIE MARIE MUSSELMAN

MICHELLE BOYER supo en 2013 que padecía un cáncer de piel avanzado. Tras seis tandas de inmunoterapia, no está curada pero está viviendo más de lo que los médicos pronosticaban.

matices importantes. El primero es que la diana del fármaco es otra proteína del linfocito B, la CD19. Y el segundo, que, en lugar de recurrir a un fármaco que dirigiese los linfocitos T contra esa proteína presente en el cuerpo de la paciente, los médicos tomaron un camino más directo. Extrajeron algunos de sus linfocitos T y los modificaron genéticamente para que reaccionaran en el acto contra la proteína CD19, sin mediación de ningún estímulo.

Ese tipo de células recibe el nombre de linfocitos T portadores de receptores antigénicos quiméricos, o T-CAR, para abreviar. Los T-CAR presentan rasgos propios de los linfocitos T y B, a semejanza de las quimeras, criaturas mitológicas engendradas supuestamente por la unión de animales distintos. La terapia con T-CAR sigue siendo experimental, pero se espera que la Agencia Federal de Fármaco y Alimentos de EE.UU. (FDA) apruebe su uso general el año que viene.

Los linfocitos T-CAR dirigidos contra la proteína CD19 se multiplicaron con tal rapidez en el cuerpo de Karen que la dosis que recibió el 10 de febrero de 2015 bastó para eliminar de raíz todos sus linfocitos B. Pero a diferencia de otros pacientes, no pudo fabricar nuevos, aunque por suerte para ella, hay una alternativa: cada mes recibe a lo largo de una hora una inyección de anticuerpos artificiales, gammaglobulinas, que la protegen contra las infecciones. Opina que las inyecciones son un desperdicio de tiempo, pero «no es quimio, así que lo llevo bien», comenta.

El tratamiento con T-CAR le provocó algo peor que las náuseas de la quimioterapia: una «tormenta» de citocinas, o síndrome de liberación de citocinas. Esta reacción ocurre cuando se activa a la vez un número mucho mayor de linfocitos T de lo que es habitual. La activación libera un torrente de mensajeros químicos, las citocinas, que el sistema inmunitario emplea en sus comunicaciones. Ello desencadena un frenesí de actividad, hasta el punto de que se convierten en una seria amenaza para las células sanas, puesto que destruyen los tejidos inalterados y acaban causando fallos multiorgánicos.

En el caso de Karen, la tormenta llegó muy rápido. Sintió un gran malestar apenas una hora después de recibir sus linfocitos T modificados. Esa misma noche ingresó en cuidados intensivos, donde permaneció ocho días, la mitad de ese tiempo en coma. No recuerda lo sucedido, pero sí las alucinaciones de días después, cuando pidió a las enfermeras que la ayudaran a reservar mesa en un restaurante con un par de golfistas famosos.

¿UNA VACUNA CONTRA EL CÁNCER?

Atacar a las células cancerosas con su propio ADN podría ayudar a erradicar los tumores y a prevenir recidivas

Beatriz M. Carreño y Elaine R. Mardis

Durante más de una década, los investigadores han estado intentando estimular los sistemas de defensa antitumorales de los pacientes con la ayuda de vacunas. Este tipo de vacunas no están diseñadas para impedir la aparición del cáncer. En lugar de ello, dotan al sistema inmunitario de las armas adecuadas contra su enemigo, las células cancerosas. Normalmente, estas no se diferencian lo bastante de las células normales para que el sistema inmunitario las reconozca y reaccione contra ellas, pero hemos ideado maneras de delatar y abordar algunas proteínas exclusivas de los tumores.

Las células humanas están recubiertas de las llamadas autoproteínas, que sirven como indicadoras para el sistema inmunitario. Hacen las veces de un documento de identidad que indica si una sustancia pertenece al cuerpo y no debe ser atacada. Por desgracia, esas proteínas también cubren el exterior de las células cancerosas. Los primeros esfuerzos de nuestro equipo y de otros para crear una vacuna contra el cáncer tal vez fracasaron porque estimulaban el sistema inmunitario para buscar proteínas que están presentes, en distinto grado, en ambos tipos de células.

Hace poco hemos descubierto proteínas que solo se hallan en los tumores. Al analizar las secuencias genómicas del tumor y del tejido normal del paciente hemos identificado proteínas exclusivas del cáncer. Después, hemos estudiado cuáles de ellas generan una intensa reacción por parte de las moléculas inmunitarias encargadas de dirigir la respuesta del organismo contra las sustancias extrañas, las proteínas del complejo mayor de histocompatibilidad, o MHC. Con esa información se pueden crear vacunas personalizadas a base de células dendríticas con el MHC del paciente que capturan las proteínas tumorales y las presentan al sistema inmunitario. Ese estímulo ayuda a desencadenar la respuesta antitumoral de los linfocitos T y marca a las células cancerosas portadoras de esas proteínas, que serán destruidas.

El año pasado ensayamos esa estrategia en tres pacientes con melanoma. Como explicamos en su día en *Science*, hallamos siete proteínas específicas del cáncer que se unían a las moléculas del MHC de cada paciente. Nos emocionó ver reacciones en los tres: de las siete proteínas, tres fueron reconocidas por los linfocitos T de los pacientes, que atacaron a las células cancerosas.

Un año después, el sistema inmunitario de los tres seguía vertiendo linfocitos T antitumorales en la sangre, lo que apunta a que nuestras vacunas podrían actuar contra las recidivas del tumor. Dos de los tumores desaparecieron o se estabilizaron, pero como los pacientes recibieron otros tratamientos, no sabemos qué fue lo determinante. Hasta la fecha, los tres siguen vivos y estables, sin ningún efecto secundario de la vacuna.

Nuestro trabajo acaba de comenzar. Elegimos el melanoma porque es un cáncer con numerosas mutaciones y proteínas diana, pero queremos examinar la estrategia con otros tipos. Antes de que nuestro método pueda formar parte del arsenal al uso contra el cáncer, será preciso estudiar cómo afecta a la larga a los tumores y acelerar el proceso de producción de la vacuna. Queremos usar las vacunas para complementar otras inmunoterapias oncológicas. Esperamos que los pacientes acaben contando con tratamientos más eficaces.



Beatriz M. Carreño es profesora de medicina en la Universidad Washington en San Luis. **Elaine R. Mardis** ocupa la cátedra de medicina Robert E. y Louise F. Dunn y es codirectora del Instituto McDonnell del Genoma de la mencionada universidad. Carreño y Mardis pretenden mejorar las oncoterapias a través del estudio de la inmunología y la genómica del cáncer.



KAREN KOEHLER no presenta ni rastro del cáncer un año después de haber recibido una inyección con sus propias células inmunitarias genomodificadas para acabar con su leucemia.

FOTOGRAFÍA DE AMY ECKERT

Entusiasta del golf desde 1999, comenzó a jugar para conocer hombres, entre ellos a su futuro marido.

Cuando recibió el alta a comienzos de marzo de 2015 estaba muy débil, pero mejoró pronto. Una prueba de médula ósea no reveló ningún indicio del cáncer y, tres semanas después, estaba de vuelta en un curso de golf con su marido. El síndrome de citocinas fue una experiencia terrible, pero a diferencia de la quimioterapia, los efectos desaparecen en cuestión de semanas sin causar la caída del cabello. Puesto que las tormentas de citocinas son bastante habituales en los tratamientos con T-CAR, los médicos investigan hasta dónde se puede forzar a los pacientes para obtener el mayor rédito sin poner en riesgo su vida. Por fuerza, la terapia con T-CAR ha de ser personalizada. La fabricación de tratamientos de ese tipo para todos los pacientes de leucemia y linfoma que lo quieran plantea un enorme reto y supone un coste desorbitado, aunque es pronto para saber exactamente cuánto, pues hasta ahora se han limitado a la investigación académica. Robert Preti, fundador de PCT, una empresa productora de T-CAR, trabaja para mejorar el proceso de producción. Considera que se trata de cuestiones técnicas que serán resueltas con unos años más de empeño.

El otro gran desafío del tratamiento con T-CAR estriba en trasladar el éxito de los tumores líquidos a los sólidos, aquellos que forman bultos en el pecho, la próstata, el pulmón, la piel y otros tejidos. Ira Mellman, vicepresidente de Inmunología del Cáncer en Genentech, explica que uno de los obstáculos es que los linfocitos T-CAR tardan mucho en atravesar la circulación sanguínea y alcanzar el tumor sólido. En cambio, en la sangre, las células del tumor líquido son relativamente fáciles de localizar. Aún más importante, mientras que los T-CAR pueden eliminar los linfocitos B presentes en la sangre y la linfa, no existe una célula comparable en los tumores sólidos sin la cual pueda vivir el paciente.

EN ESTADO SÓLIDO

Los tumores sólidos plantean otras dificultades para las inmunoterapias. Suelen estar circundados por una matriz de tejido conjuntivo y de otra naturaleza que impide que las células penetren en la masa maligna. Además, la presión interna del tumor suele ser más elevada que la de alrededor, lo que dificulta tanto la difusión de las señales químicas que el sistema inmunitario despliega para atacar las células aberrantes como la de los medicamentos.

A pesar de todo, los tumores sólidos son vulnerables. En 2011, la FDA aprobó el anticuerpo monoclonal ipilimumab como tratamiento para los casos avanzados de melanoma. A diferencia de los tratamientos ordinarios, dicho anticuerpo no ha sido concebido para matar directamente los tumores. En lugar de ello, libera los frenos biológicos con los que ciertos tipos de cáncer contienen al sistema inmunitario, permitiendo que las defensas corporales actúen sin ataduras.

El melanoma tiene el hábito de engañar a las células inmunitarias. Los grupos de células cancerosas esgrimen diversas proteínas mal formadas en su superficie que los linfocitos T deberían reconocer y destruir antes de que el crecimiento aberrante permitiera que el tumor ganara en tamaño. Pero de vez en cuando, el tumor incipiente idea una artimaña: segrega señales químicas que mandan un mensaje de normalidad a los linfocitos T para que suspendan el ataque.

En efecto, las células cancerosas simulan una característica del sistema inmunitario: un mecanismo de seguridad que desmoviliza los leucocitos antes de que comiencen a dañar el tejido sano. Este mecanismo consta de una serie de puntos de control que activan o inactivan a dichas células, según las señales químicas que concurren. Si esos puntos permaneciesen «abiertos», la reacción inmunitaria probablemente mataría a la persona mucho antes que el crecimiento aberrante del tumor. Las células cancerosas impiden que el sistema inmunitario actúe contra ellas generando proteínas que bloquean los puntos de control.

Mediante la anulación de esa señal falsa, el ipilimumab y otros inhibidores de los puntos de control reactivan las células inmunitarias, que vuelven a reconocer sus dianas. El ipilimumab no ha tardado en demostrar su eficacia contra el cáncer de pulmón y el melanoma, por lo que los laboratorios farmacéuticos han comenzado a desarrollar fármacos basados en esa estrategia. El expresidente de EE.UU. Jimmy Carter, de 91 años, ha tomado uno de ellos, el pembrolizumab, para tratar los tumores cerebrales generados por un melanoma, y a finales de 2015 anunció que todos habían desaparecido.

A Michelle, con una enfermedad y un tratamiento similar, no le han ido tan bien las cosas. Algunos especialistas especulan con que la edad avanzada de Carter ha podido jugar a su favor. Las células cancerosas viejas poseen más mutaciones, así que su sistema inmunitario tal vez solo necesitó un empujón para movilizar los linfocitos T que ya estaban allí. En cambio, en algunos pacientes, los linfocitos T no consiguen irrumpir en el tumor, por lo que no hay nada que desbloquear.

Continúa en la página 26

Tres estrategias inmunológicas

La cirugía, la radioterapia y la quimioterapia han servido durante mucho tiempo como tratamientos contra el cáncer, pero los ensayos clínicos del último lustro han demostrado que la sobreestimulación de las células inmunitarias del cuerpo, concebidas para luchar contra bacterias y virus, entre otros agentes nocivos, puede ser un arma poderosa que ayude a las células a reconocer y destruir los tumores. Las estrategias mostradas aquí se están ensayando solas o combinadas con otros tratamientos.

¿Cómo está cambiando la inmunoterapia el tratamiento de los tumores sólidos?

El cáncer de piel, de pulmón y de otros tejidos constituyen tumores sólidos porque forman una masa que crea su propio entorno protector. Los inhibidores de los puntos de control ayudan a perturbar ese ambiente y logran eliminar los tumores avanzados de piel en uno de cada cinco pacientes participantes en ensayos clínicos.

Inhibidores de los puntos de control

La respuesta inmunitaria descontrolada llega a ser tan potente que acaba destruyendo los tejidos sanos. Por tanto, ciertas células inmunitarias denominadas linfocitos T deben superar varios puntos de control biológicos antes de desplegar toda su fuerza. A menudo, las células cancerosas manipulan esos puntos de control para eludir el ataque del sistema inmunitario. Los nuevos fármacos, llamados inhibidores de los puntos de control, inhabilitan las señales cancerosas que moderan la respuesta inmunitaria, permitiendo que esta ataque al tumor.

Anticuerpo artificial

Los fármacos consisten en anticuerpos artificiales seleccionados para inhabilitar los frenos que las células tumorales imponen al sistema inmunitario.

Tumor

Proteína detectora del punto de control

Proteína tumoral que silencia a los linfocitos T

Muchas células cancerosas se camuflan ante el sistema inmunitario exhibiendo proteínas específicas que indican a los linfocitos T cercanos que no prosigan con su activación y, esencialmente, que dejen tranquilo al tumor.

Vacuna de células dendríticas

Las células dendríticas ejercen labores de vigilancia en busca de restos de proteínas (antígenos) que parezcan extraños y los presentan a otros leucocitos, los linfocitos T CD4+ y CD8+, que a partir de ese momento reconocerán y atacarán cualquier célula que los incorpore. Seleccionando los antígenos hallados en las células cancerosas, pero no en las sanas, y mezclándolos con células dendríticas del paciente fuera del cuerpo, se ha creado una vacuna que busca y destruye esas células tumorales durante el resto de la vida.

Se extraen células sanas, células tumorales y células dendríticas inmaduras del paciente.

Tumor

Célula tumoral

Célula dendrítica inmadura

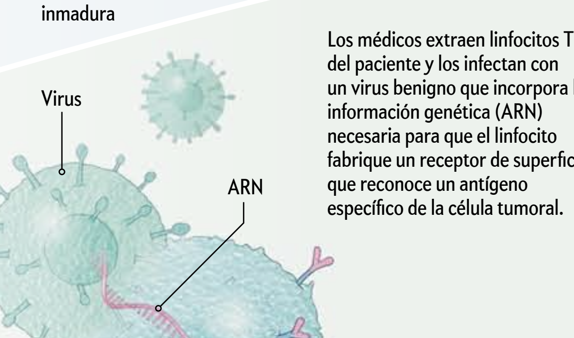
Antígeno específico del cáncer

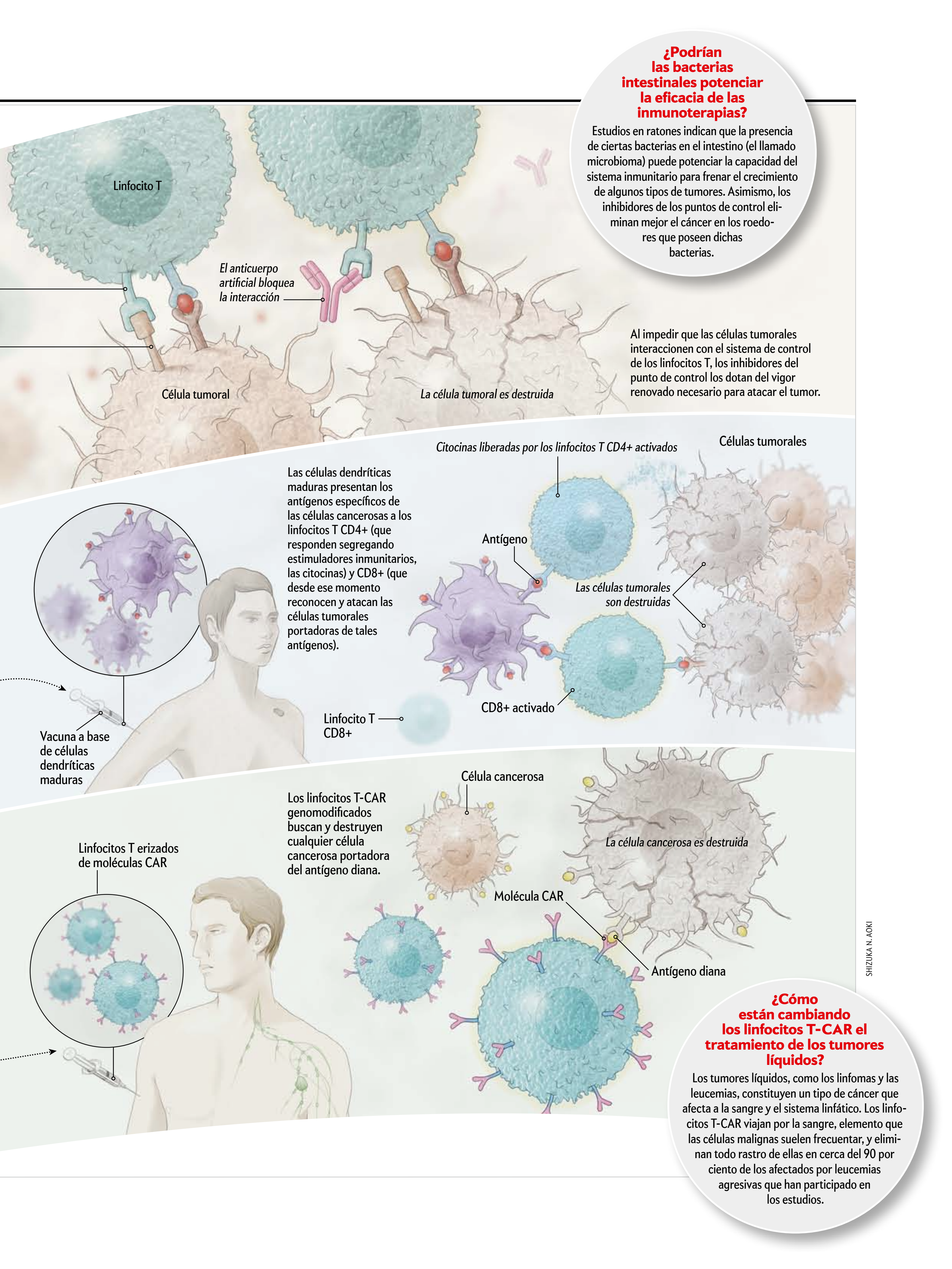
Se comparan los programas genéticos de las células malignas y sanas en busca de antígenos que se hallen solamente en las primeras. Estos antígenos se agregan a las células dendríticas, que los absorben. Las células dendríticas ahora maduras se reinyectan al paciente.

Linfocitos T-CAR

Los linfocitos T con receptor antigénico quimérico (T-CAR) reúnen las cualidades de dos tipos de linfocitos: los T y los B. Las moléculas receptoras de los linfocitos T-CAR se asemejan a híbridos entre receptores de ambos tipos de células. La proteína CAR permite a esta célula inusual reconocer los antígenos seleccionados y destruir cualquier célula portadora de estos. Esa mezcla elimina los pasos intermedios que normalmente siguen los linfocitos B y T, lo que convierte a los linfocitos T-CAR en defensores irrefrenables.

Los médicos extraen linfocitos T del paciente y los infectan con un virus benigno que incorpora la información genética (ARN) necesaria para que el linfocito fabrique un receptor de superficie que reconoce un antígeno específico de la célula tumoral.





¿Podrían las bacterias intestinales potenciar la eficacia de las inmunoterapias?
Estudios en ratones indican que la presencia de ciertas bacterias en el intestino (el llamado microbioma) puede potenciar la capacidad del sistema inmunitario para frenar el crecimiento de algunos tipos de tumores. Asimismo, los inhibidores de los puntos de control eliminan mejor el cáncer en los roedores que poseen dichas bacterias.
Linfocito T
El anticuerpo artificial bloquea la interacción
Célula tumoral
La célula tumoral es destruida
Al impedir que las células tumorales interaccionen con el sistema de control de los linfocitos T, los inhibidores del punto de control los dotan del vigor renovado necesario para atacar el tumor.
Citocinas liberadas por los linfocitos T CD4+ activados
Células tumorales
Las células dendríticas maduras presentan los antígenos específicos de las células cancerosas a los linfocitos T CD4+ (que responden segregando estimuladores inmunitarios, las citocinas) y CD8+ (que desde ese momento reconocen y atacan las células tumorales portadoras de tales antígenos).
Antígeno
Las células tumorales son destruidas
Vacuna a base de células dendríticas maduras
Linfocito T CD8+
CD8+ activado
Célula cancerosa
Los linfocitos T-CAR genomodificados buscan y destruyen cualquier célula cancerosa portadora del antígeno diana.
La célula cancerosa es destruida
Linfocitos T erizados de moléculas CAR
Molécula CAR
Antígeno diana
SHIZUKA N. AOKI
¿Cómo están cambiando los linfocitos T-CAR el tratamiento de los tumores líquidos?
Los tumores líquidos, como los linfomas y las leucemias, constituyen un tipo de cáncer que afecta a la sangre y el sistema linfático. Los linfocitos T-CAR viajan por la sangre, elemento que las células malignas suelen frecuentar, y eliminan todo rastro de ellas en cerca del 90 por ciento de los afectados por leucemias agresivas que han participado en los estudios.

Viene de la página 23

En otros pacientes, los linfocitos T parecen estar en el lugar adecuado, pero el fármaco sigue sin funcionar. Un estudio de 2015 publicado en *New England Journal of Medicine* describe cómo muchos pacientes de melanoma mejoraron después de recibir dos inhibidores de los puntos de control, en vez de uno solo.

Los médicos aún no saben predecir quién responderá a uno u otro tipo de inhibidor o a una combinación de ellos, por lo que Michelle y otros pacientes semejantes deben seguir probando diversas terapias. Actualmente, cerca del 20 por ciento de los participantes en los ensayos clínicos del melanoma avanzado consigue una respuesta completa con los inhibidores de los puntos de control, y más del 50 por ciento manifiesta algún tipo de respuesta. Para complicar aún más las cosas, los inhibidores parecen funcionar en ciertos tumores que atraen algunos linfocitos T, mientras que en otras ocasiones su efecto es nulo pese a que el tumor alberga gran número de linfocitos. Ello induce a pensar que el cáncer también despliega sus artimañas.

Así las cosas, hallar un tratamiento eficaz contra el tumor sólido del paciente se convierte en un ensayo de prueba y error, como demuestra la experiencia de Michelle. Dos años después de la operación en que le extirparon el lunar maligno de la espalda, le comunicaron que el melanoma se había recrudecido y se estaba diseminando por los pulmones y el pecho. Como los tumores eran ya demasiado grandes para ser extirpados, Michelle accedió a participar en un ensayo clínico a inicios de 2013 en el que le inyectarían altas dosis de interleucina 2 (IL-2), una de las señales químicas que potencian la actividad antitumoral del sistema inmunitario. Al principio, el fármaco paralizaba aparentemente el crecimiento de los tumores, pero al cabo de tres meses las imágenes revelaron que el cáncer avanzaba de nuevo.

Michelle optó por un segundo ensayo, esta vez uno que combinaba el novísimo ipilimumab con otra molécula de señalización inmunitaria llamada IL-21. Pero en pocas semanas, la intensidad de los efectos secundarios de la IL-21 (náuseas, diarrea y dolor

GUERRA BACTERIOLÓGICA

Algunos tipos de bacterias intestinales pueden potenciar la capacidad del cuerpo para luchar contra los tumores malignos

María Luisa Alegre y Thomas F. Gajewski

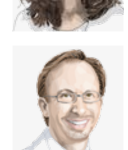
¿Por qué ciertos pacientes responden bien a las nuevas inmunoterapias contra el cáncer y otros no? La dotación genética del tumor y la del paciente pueden tener algo que ver. Pero nuestro trabajo y el de otros científicos apuntan también a la influencia del microbioma, las bacterias inocuas que colonizan diversas partes del cuerpo humano.

Tales comunidades bacterianas, sobre todo las residentes en el intestino, pueden diferir en su composición de una persona a otra. Esas especies, a su vez, influyen en la magnitud de la respuesta inflamatoria del sistema inmunitario del anfitrión a través de mecanismos que aún no se conocen en su totalidad. Algunas bacterias desatan una respuesta inflamatoria desaforada que aboca a las células normales a volverse cancerosas o confunde a las células inmunitarias, que acaban atacando por error los tejidos sanos, como ocurre en la artritis reumatoide.

Otras veces, en cambio, las bacterias pueden estimular respuestas terapéuticas. Nuestro grupo, radicado en la Universidad de Chicago, ha estudiado cepas de ratones genéticamente idénticos que acogían microbiomas distintos por haber crecido en ambientes diferentes. Tras la inyección de células de melanoma, se constató que los tumores resultantes crecían con lentitud en unos y con más rapidez en otros. Los ratones cuyo tumor crecía con lentitud evidenciaron una potente respuesta inmunitaria contra este.

Un hecho sorprendente es que si trasladábamos el microbioma de los ratones que mostraban un crecimiento lento a los otros a través del trasplante de su materia fecal, los tumores de estos también evolucionaban con lentitud.

El análisis del ADN de las muestras fecales de ambos grupos reveló dos cepas bacterianas del género *Bifidobacterium* que parecían ser las responsables de la actividad antitumoral mejorada. De forma notable, alimentar a los ratones con una cepa bacteriana, de *Bifidobacterium longum* o de *Bifidobacterium breve*, bastó para estimular el sistema inmunitario y retrasar el crecimiento del tumor en los ratones receptores de las células tumorales. La presencia de estas cepas beneficiosas condicionó la eficacia de un fármaco inmunoterapéutico, un inhibidor de los puntos de control. Los tumores desaparecieron por completo en los ratones tratados con el inhibidor del punto de control cuyo microbioma contenía *Bifidobacterium*. Por el contrario, los que carecían de dichas especies solo experimentaron una respuesta parcial al fármaco, pero también se curaban si ingerían las cepas adecuadas.



María Luisa Alegre es profesora del departamento de medicina en la Universidad de Chicago.
Thomas F. Gajewsky es profesor de los departamentos de patología y medicina de la misma universidad.

Un segundo equipo de investigación, sito en Francia, llevó a cabo un experimento similar con otro inhibidor de punto de control. Resultó que otro género bacteriano, *Bacteroides*, permitía a los animales tratados acabar con los tumores inyectados. Si a los roedores se les administraba un antibiótico que destruía esos microbios el fármaco antitumoral perdía su eficacia, algo que deberían tener en cuenta los médicos, dado el gran número de pacientes con cáncer que reciben antibióticos. Los resultados de los grupos de Francia y de Chicago se publicaron el pasado noviembre en *Science*.

Antes de poder recomendar un tratamiento a los pacientes hemos de clasificar las bacterias del microbioma humano y sus posibles efectos antitumorales. Si bien las bacterias como *Bifidobacterium* parecen tener efectos beneficiosos, otras cepas pueden hacer que los tumores crezcan con más rapidez. El consumo de yogur como potenciador de los tratamientos inmunitarios podría no funcionar. Este producto lácteo contiene *Bifidobacterium lactis* o *Bifidobacterium bifidum*, que podrían no tener el mismo efecto que la especie suministrada a los ratones de los estudios. Por otra parte, los médicos no desean potenciar demasiado la actividad del sistema inmunitario, pues eso podría fomentar las enfermedades autoinmunitarias.

intenso) obligó a suspender las inyecciones, aunque siguió recibiendo el ipilimumab. A finales de 2013, algunas de las manchas tumorales habían comenzado a crecer, así que el equipo médico optó por la radioterapia para intentar contenerlas. En la primavera del año siguiente, algunos tumores habían encogido pero otros nuevos habían surgido en la cabeza y el pecho.

Le extirparon el bulto del pecho, y con otras dos inmunoterapias mantuvieron a raya el resto durante algún tiempo más. No obstante, en enero de 2015 quedó claro que necesitaba otro plan de acción, pues nuevos tumores comenzaban a aparecer en el cerebro, el pecho y el abdomen. Un mes después se incorporó a un nuevo ensayo en el que se combinó otro inhibidor de punto de control con un fármaco que retarda el crecimiento tumoral. En el momento de publicar este artículo, los focos tumorales de Michelle permanecían estables e incluso algunos se habían contraído levemente. Ese gran número de tratamientos la han dejado maltrecha. Pasa las noches y muchos días tumbada en el sofá para reposar la espalda. Como ingeniera de estructuras, va a trabajar casi todas las mañanas que no tiene sesión de tratamiento. Por otra parte, se entretiene jugando a videojuegos; *Call of duty* es su favorito. Todos dicen que no se arrepiente de haber probado seis tipos distintos de inmunoterapia hasta ahora. «Parece que algunos han frenado un poco el crecimiento de los tumores», comenta. Michelle recuerda cómo un médico le dijo que parte del juego del melanoma no es hallar a toda costa el tratamiento adecuado ahora, sino lograr vivir lo suficiente para dar con él. De ahí su actitud y la aceptación de sus circunstancias actuales.

MIRANDO HACIA ADELANTE

Ese tiempo que Michelle y otros pacientes están viviendo resulta en cierto modo reconfortante y supone un motivo de satisfacción para Ira Mellman. «Las posibilidades de la inmunoterapia comienzan a convertirse en resultados tangibles para el paciente», asegura. «A los investigadores les inquietaba que su trabajo no sirviera de ayuda nunca. Ahora pueden dedicarse a refinar los tratamientos. Necesitamos saber dónde están los límites y cuándo nos estamos acercando a ellos. Sin duda es una manera inspiradora y emocionante de hacer ciencia», añade.

Cree que poco a poco el proceso de elección de la inmunoterapia ganará en lógica. A un paciente con un tumor sólido primero se le debe hacer una biopsia para determinar la presencia de los linfocitos T en el tumor. Si este alberga el número suficiente, el enfermo probablemente recibirá un único inhibidor de puntos de control o tal vez una combinación de varios. Hasta ahora, la FDA ha aprobado tres, pero hay más de una docena en desarrollo. Si, en cambio, el tumor aún no ha atraído a muchos, los médicos pueden intentar varias técnicas para dirigirlos hacia su interior y alertar al sistema inmunitario del crecimiento aberrante antes de abrir los puntos de control.

También se investiga cómo hacer que los tratamientos antitumorales habituales, como la radioterapia y la quimioterapia, estimulen la respuesta inmunitaria. Destruir cierto número de células cancerosas con dosis bajas de ambas terapias libera restos del tumor, lo que debería bastar para alertar al sistema inmunitario del crecimiento anómalo y enviar a los linfocitos T. (Conseguir el equilibrio correcto resulta difícil, puesto que el exceso de quimioterapia y radioterapia también merma las defensas.) Así las cosas, la administración de un inhibidor de puntos de control debería ser eficaz contra el cáncer debilitado, antes de que tenga tiempo de recobrar fuerzas. Pero esta hipótesis está pendiente de ser contrastada.



SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Comprender el cáncer*, un monográfico que recoge nuestros mejores artículos sobre los avances en la investigación y tratamiento de esta enfermedad.

www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/79

Por último, si bien el número de inmunoterapias aprobadas por la FDA no cesa de crecer, todas comparten un inconveniente ajeno a la medicina: su precio. La combinación de terapias eleva aún más el coste de unos tratamientos ya de por sí costosos. El mercado mundial de los medicamentos oncológicos roza los cien mil millones de dólares anuales, según IMS Health, empresa especializada en información médica. Los directivos de las farmacéuticas comprenden que las aseguradoras privadas y los sistemas de sanidad pública no quieran o no puedan asumir los costes de las combinaciones de fármacos por tiempo indefinido, con montantes de hasta 150.000 dólares por paciente, o más. Por eso examinan la posibilidad de mejorar la fabricación, rebajar las dosis y acortar los tratamientos, entre otras estrategias, a fin de reducir los costes actuales.

Los tratamientos curativos distan de ser perfectos. Karen aún padece secuelas del suyo. Se cansa más que antes, o, si va a comer con sus amigos, a veces no tiene el aliento necesario para dar un paseo con su marido. «La parte más dura ahora es saber hasta dónde puedo llegar», confiesa. Pero puede disfrutar de la jubilación, que adelantó a raíz del fracaso de su primer tratamiento. Juega al golf, camina a pie o con raquetas de nieve cuando el tiempo acompaña. Inspirada por los perros terapéuticos que la visitaron durante su ingreso, lleva al instituto de secundaria local a su Golden Retriever, CJ, para aliviar el estrés de los alumnos durante los exámenes. Los oncólogos creen que la inmunoterapia pronto concederá a muchos más pacientes la oportunidad de gozar de una vida ganada. IyC

PARA SABER MÁS

The basic principles of chimeric antigen receptor design. Michel Sadelain y otros en *Cancer Discovery*, vol. 3, n.º 4, págs. 388-398, abril de 2013. **http://cancerdiscovery. aacrjournals.org/content/3/4/388.full.pdf**

2015 Guidance on cancer immunotherapy development in early-phase clinical studies. Guidance development review committee y otros en *Cancer Science*, vol. 106, n.º 12, págs. 1761-1771, diciembre de 2015. **http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cas.12819/epdf**

Advances in immunotherapy for melanoma. Jason M. Redman y otros en *BMC Medicine*, vol. 14, n.º 20, 6 de febrero de 2016. **http://bmcmedicine. biomedcentral.com/articles/10.1186/s12916-016-0571-0**

EN NUESTRO ARCHIVO

Inmunoterapia contra el cáncer. Lloyd J. Old en *IyC*, noviembre de 1996.

Vacunas contra el cáncer. Eric Von Hofe en *IyC*, diciembre de 2011.

Desactivar el cáncer. Jedd D. Wolchok en *IyC*, julio de 2014.

Viroterapia contra el cáncer. Douglas J. Mahoney, David F. Stojdl y Gordon Laird en *IyC*, enero de 2015.



FABRICANTE DE HERRAMIENTAS: El profesor de antropología Dietrich Stout practica la talla lítica en el Laboratorio de Tecnología Paleolítica de la Universidad Emory.

COGNICIÓN HUMANA

¿CÓMO NOS CAMBIÓ LA FABRICACIÓN DE HERRAMIENTAS?

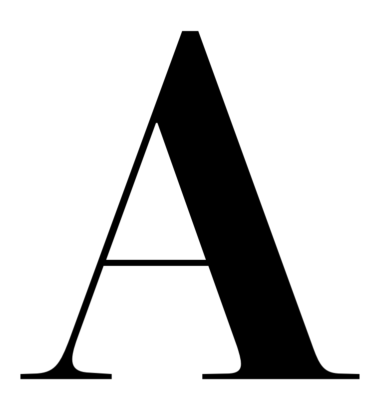
Las neuroimágenes comienzan a revelar la manera en que la talla lítica moldeó nuestras facultades cognitivas

Dietrich Stout

FOTOGRAFÍAS DE GREGORY MILLER



Dietrich Stout es profesor de antropología de la Universidad Emory. Su investigación sobre la fabricación de útiles líticos del Paleolítico integra métodos multidisciplinares, que van de la arqueología a las técnicas de neuroimagen.



ÚN CONSERVO MI PRIMERA BIFAZ. LA TALLÉ DE UN TROZO DE SÍLEX que recogí paseando por unos campos de labranza en el condado de Sussex Occidental. Es bastante tosca, nada que pudiera impresionar a nuestro antepasado, *Homo heidelbergensis*. Este primo de *Homo sapiens* nos legó hachas de mano de refinada factura, hace medio millón de años, en el cercano yacimiento de Boxgrove.

Pero trabajé con afán para fabricar ese rudimentario útil y me siento orgulloso de ello. Lo que de verdad importa no es que descubriera una nueva afición. Lo relevante es que con ella me lancé a indagar algunas cuestiones clave de la evolución humana y del florecimiento del lenguaje y la cultura, sellos distintivos de nuestra especie.

Reproducir las habilidades de los pueblos prehistóricos con el fin de comprender el origen de la humanidad no es nada nuevo; los arqueólogos lo vienen haciendo desde hace décadas. Pero, sin duda, en los últimos quince años hemos retomado ese camino con renovado interés.

Arqueólogos y neurocientíficos colaboramos desde la consola de los tomógrafos y los imanes de resonancia para averiguar lo que sucede bajo el cráneo de un fabricante de herramientas contemporáneo mientras este arranca con paciencia lascas de una piedra hasta convertirla en una bifaz. Con las imágenes esperamos descubrir las regiones cerebrales que con su evolución permitieron a las gentes del Paleolítico tallar con pericia bifaces y cuchillos a partir de pedazos informes de roca.

La labor conjunta de arqueólogos y neurocientíficos ha rescatado una idea desacreditada en el pasado: que la fabricación de útiles supuso un impulso decisivo para la evolución humana. El antropólogo británico Kenneth Oakley aseguraba hace setenta años en su libro *Man the tool-maker* («El hombre, fabricante de herramientas»), que la confección de útiles fue el «principal rasgo biológico» de la humanidad que catalizó la evolución de nuestro poder de coordinación mental y corporal.

La idea cayó en desgracia cuando los etólogos aportaron pruebas del uso y la fabricación de herramientas en otras especies, como los simios, los cuervos, los delfines o los pulpos. Así lo expresaría en 1960 el paleontólogo Louis Leakey en su famosa réplica al histórico descubrimiento de Jane Goodall acerca del uso de útiles por parte del chimpancé: «Ahora tendremos que redefinir el concepto de herramienta y de hombre, o aceptar a los chimpancés como humanos». Para muchos, las complejas relaciones sociales reemplazaron la manufactura de artefactos como factor central en la evolución del cerebro humano. En los años ochenta y noventa del siglo XX, las influyentes hipótesis de la «inteligencia maquiavélica» y el «cerebro social» sostenían que los mayores desafíos mentales de los primates estriban en aventajar a sus congéneres, no en comprender y dominar su entorno físico. Estas teorías ganaron peso empírico con la constatación de que los primates que forman grandes grupos sociales tienden a poseer cerebros voluminosos.

Sin embargo, investigaciones más recientes, entre ellas la nuestra, demuestran que la idea de «El hombre, fabricante de herramientas» no está obsoleta, aunque sin duda el lenguaje de Oakley sí ha quedado desfasado. No es indispensable que la fabricación de artefactos sea una capacidad privativa del hombre para considerarla importante en nuestra evolución. Lo que importa es el tipo de útiles que creamos y cómo aprendemos a elaborarlos. La especie humana destaca entre los primates por su indiscutible capacidad para aprender de sus congéneres. En particular, somos muy hábiles en imitar lo que hacen otras personas. La imitación constituye un prerrequisito para aprender habilidades técnicas complejas y se considera inherente a la capacidad de la cultura humana para acumular conocimiento, una capacidad extraordinaria si se compara con la de otros simios. Así pues, parece precipitado desechar la idea de que los antiguos artefactos líticos no pueden aportar información relevante sobre

EN SÍNTESIS

Reproducir la tecnología de las poblaciones prehistóricas constituye un modo de resolver nuestras dudas sobre la evolución humana y, en particular, sobre el desarrollo del lenguaje y la cultura.

Una versión novedosa de este enfoque recurre a la tomografía y a la resonancia magnética cerebral para observar las regiones de neuronas que se activan mientras se golpea una piedra hasta convertirla en una bifaz.

La colaboración entre arqueólogos y neurocientíficos ha rehabilitado una tesis desacreditada que consideraba la fabricación de útiles un detonante fundamental de la evolución humana.

Aprender y enseñar el arte de fabricar útiles en la Edad de Piedra pudo suponer tal desafío para nuestros ancestros que motivó la evolución del lenguaje humano.

CLASE DE TALLA: Nada Khreisheh (*arriba, a la derecha*) dedica veinte horas cada semana a enseñar la fabricación de bifaces en el Laboratorio de Tecnología Paleolítica de la Universidad Emory. Los alumnos reciben cien horas de clase. La bifaz de sílex visible a la derecha fue la primera tallada por el autor.



la evolución de la cognición humana. Aprender y enseñar la cada vez más compleja manufactura de los útiles pudo suponer un desafío tan formidable para nuestros ancestros que bien podría haber impulsado la evolución del lenguaje. De hecho, muchos neurocientíficos creen que ciertas estructuras cerebrales son responsables a la par de las habilidades lingüísticas y manuales.

Para comprobar dichas teorías hemos tenido que analizar con esmero cómo se elaboraban esas antiguas herramientas y comparar los resultados con los datos de que disponemos sobre la evolución de los sistemas cerebrales relevantes. El primer problema radica en que el registro fósil no conserva ni el cerebro ni el comportamiento. Dada la escasez de datos, el único recurso fue reproducir en el laboratorio el tipo de habilidades que se transmitieron de generación en generación hace milenios. Por esta razón, junto con mis alumnos y mis colaboradores, llevamos años intentando emular la destreza de los fabricantes de herramientas del Paleolítico.

ARQUEOLOGÍA EXPERIMENTAL

Tal vez el uso de las técnicas de neuroimagen para estudiar algunas de las técnicas más antiguas de la humanidad despierte extrañeza. Cuando comenzamos a acarrear piedras en carretilla a un moderno laboratorio de neuroimagen atrajimos miradas de curiosidad. Pero no tiene nada de extraño que los arqueólogos experimenten. Estudiar el presente es desde hace mucho tiempo una de las mejores formas de conocer el pasado. Los científicos han ideado ensayos para replicar antiguas técnicas de fundición (arqueometalurgia) y observar la descomposición de los cadáveres animales (tafonomía) con el fin de entender mejor cómo fosilizan. Los experimentos informales sobre la fabricación o la talla de herramientas se remontan al siglo XIX, y los ensayos controlados están a la orden del día en el estudio de la tecnología lítica.

El ámbito de estos experimentos se ha ampliado en los últimos años. En 1990 mis tutores de posgrado Nicholas Toth y Kathy Schick, hoy ambos en la Universidad de Indiana y en el Instituto de la Edad de Piedra, en Bloomington, se propusieron investigar, con una técnica de imagen recién desarrollada, la reacción del cerebro de una persona mientras fabricaba una herramienta paleolítica. Abundando en esa idea inicial, hace quince años comencé mi propia investigación con el fin de averiguar lo que ocurre en el cerebro mientras se talla una piedra.

Hoy mi laboratorio funciona como un taller donde se aprende a fabricar útiles líticos. Mientras escribo estas líneas, en mi oficina de la Universidad Emory, alcanzo a escuchar el repiqueteo de

los aprendices proveniente de la zona de trabajo al aire libre. El año pasado la pila de lascas de sílex alcanzó los tres metros de diámetro y un buen palmo de espesor, con casi 1500 kilogramos de roca hecha añicos. Cuando me asomo a la ventana veo a la investigadora de posdoctorado Nada Khreisheh aconsejando a un estudiante frustrado.

Khreisheh dedica una veintena de horas a la semana a formar a otros tantos alumnos en el antiguo arte de la fabricación de hachas de mano (cada uno recibe cien horas de instrucción). Es nuestro proyecto más ambicioso hasta hoy. Las sesiones se graban en vídeo para averiguar qué técnicas de aprendizaje funcionan mejor. También guardamos y medimos cada herramienta acabada para supervisar los avances. Los alumnos se someten continuamente a exploraciones en el aparato de resonancia magnética con el fin de analizar los cambios en la estructura y el funcionamiento del cerebro, así como a pruebas psicológicas para comprobar si sus aptitudes, como la memoria a corto plazo o la capacidad de planificación, están vinculadas con la destreza en la manufactura de los utensilios. Supone un trabajo ingente pero fundamental para entender las sutilezas de esta técnica prehistórica.

Por lo menos, todo ese esfuerzo nos ha enseñado lo difícil que es fabricar ese tipo de artefactos. Pero necesitamos saber qué motiva esa dificultad. Oakley y otros partidarios del argumento de «El hombre, fabricante de herramientas» pensaban que la clave de su elaboración era la singular capacidad de pensamiento abstracto del hombre; es decir, la facultad para concebir una suerte de modelo mental de diversos tipos de herramientas y reproducirlo. Con todos mis respetos, discrepo. Como diría cualquier artesano conocedor de su oficio, saber bien lo que se quiere no es lo más difícil; lo verdaderamente difícil es hacerlo.

Todo principiante que quiera tallar una bifaz deberá dominar una técnica de percusión que implica desbastar una roca con un «martillo» de asta, hueso o piedra, hasta convertirla en una herramienta útil. La tarea exige golpes contundentes, secos y precisos al milímetro, que hay que asestar con rapidez, sin posibilidad de corrección o vuelta atrás en su ejecución. Como al cincelar una escultura de mármol, con cada golpe se extrae algo irrestituible: hasta los errores más pequeños pueden malograr la pieza entera.

Por medio de un sistema de control del movimiento, el equipo de Blandine Brill de la Escuela de Estudios Avanzados en Ciencias Sociales de París, ha averiguado que, a diferencia de los principiantes, los talladores expertos modulan la fuerza de los golpes para arrancar lascas de diferente tamaño. Encadenar la serie de percusiones de fuerza dispar que se precisa para modelar un diseño abstracto, como un hacha de mano, solo se logra a base de una larga y esmerada práctica.

Nuestros antepasados afrontaron ese mismo problema para dominar el arte de la talla lítica, con la diferencia de que sus vidas dependían en buena parte del éxito de la empresa. La demanda de herramientas, aunada con las complejas interacciones sociales que se crean durante la enseñanza de su fabricación, pudo ser el catalizador de la evolución de la cognición humana. Hemos bautizado esta nueva versión de la hipótesis de «El hombre, fabricante de herramientas» de Oakley como *Homo artifex*, que en latín significa habilidad, creatividad y artesanía.

HERRAMIENTAS EN EL CEREBRO

Enseñar a trabajar el pedernal no es el único reto técnico que supone investigar estas prácticas prehistóricas. Las técnicas corrientes de neuroimagen no se prestan para ciertos aspectos del estudio de la fabricación de herramientas líticas. Quien se haya sometido alguna vez a una resonancia magnética (RM) recordará que si se mueve durante la prueba, la imagen se malogra. Y permanecer inmóvil dentro de un tubo de sesenta centímetros de ancho lo más que le permite a uno es echar una siesta, no digamos tallar.

En nuestros primeros experimentos sorteamos ese problema recurriendo a una técnica de imagen conocida como tomografía por emisión de positrones con fluorodesoxiglucosa (TEP-FDG). La molécula radiactiva usada para captar la imagen de la actividad cerebral se inyecta por vía endovenosa, en este caso a través del pie, para dejar libres las manos. Si bien un poco doloroso, el procedimiento permite trabajar sin estorbo el trozo de piedra destinado a convertirse en una bifaz o un cuchillo, mientras el marcador se acumula en los tejidos activos del cerebro. Acabada la talla, da inicio la exploración cerebral para averiguar en qué lugares se ha concentrado el compuesto químico.

Esa técnica me permitió investigar dos industrias de la Edad de Piedra —la Olduvayense y la Achelense tardía— que ocupan de principio a fin el Paleolítico inferior, un período evolutivo crucial comprendido entre hace 2,6 millones y 200.000 años, en el que se triplicó el volumen cerebral de los homininos (la especie humana y sus antepasados extintos). Queríamos explorar en el laboratorio si el desarrollo de tales industrias planteó nuevas exigencias al cerebro que, con el transcurrir de los milenios y por selección natural, pudieran haber propiciado el aumento de volumen.

La fabricación de herramientas olduvayenses (así bautizadas por la garganta de Olduvai, en Tanzania, donde fueron descritas a mediados del siglo XX por el arqueólogo Louis Leaky y la paleoantropóloga Mary Leakey) consiste en extraer lascas afiladas del núcleo de un canto. Estos sencillos fragmentos de piedra fueron los primeros «cuchillos» de la humanidad. Conceptualmente, la manufactura no puede ser más simple. Con todo, los primeros datos de la TEP confirmaron que el tallado sigue siendo una tarea complicada que va mucho más allá del simple golpeo de unas piedras con otras.

En nuestro estudio dejamos que los participantes practicaran durante cuatro horas sin recibir ninguna orientación. Mientras se familiarizaban con la tarea, aprendieron a prestar atención a los rasgos peculiares de cada núcleo, como las zonas salientes, que son más fáciles de romper. Este proceso de aprendizaje genera antes y después del ejercicio diferentes patrones de actividad en la corteza visual, radicada en la parte posterior del cerebro. Pero cuatro horas de práctica no es mucho tiempo, ni siquiera para la primera técnica de la humanidad.

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Orígenes de la mente humana*, un monográfico que ahonda en la relación entre las capacidades cognitivas y los rasgos físicos, biológicos y evolutivos del cerebro humano.



www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/70

Si observamos a los talladores experimentados, cuya destreza se acerca más a la que debieron tener los fabricantes olduvayenses, vemos algo distinto. Tal y como demostró el equipo de Brill, los iniciados se distinguen por su capacidad para medir la fuerza con la que asestan los golpes con el percutor, y extraen así las lascas del núcleo con la pericia debida. En su cerebro, esta habilidad estimuló la actividad de la circunvolución supramarginal del lóbulo parietal, implicado en la apreciación de la localización del cuerpo en el entorno.

Hace alrededor de 1,7 millones de años, la industria olduvayense de lascas empezó a dar paso a la achelense (bautizada así por la localidad gala de Saint-Acheul), que se distingue por la fabricación de útiles mejor rematados, como bifaces en forma de lágrima. Algunos de esos artefactos achelenses, como los del yacimiento inglés de Boxgrove, de 500.000 años de antigüedad, dan muestras de un gran refinamiento. Las delgadas secciones transversales, la simetría tridimensional y los bordes afilados y regulares delatan suma destreza en la talla.

Los talladores modernos saben que esta técnica no solo demanda precisión, sino también una planificación adecuada. Como el golfista que escoge el palo apropiado, el tallador emplea diferentes percutores duros (piedra) o blandos (asta o hueso) en cada fase para preparar los bordes y superficies del núcleo con el fin de que se fracture a voluntad. La labor exige alternar entre diversas tareas secundarias y mantener firme en la mente la idea última de rematar la bifaz, sin prisas. Por amarga experiencia, sé que las prisas son malas consejeras en esto de tallar piedras; si uno se siente cansado o hastiado, es mejor dejarlo para otro momento.

El esfuerzo que supone fabricar una herramienta del Achelense tardío también deja una impronta peculiar en las imágenes cerebrales. Algunas áreas aparecen implicadas tanto en el tallado olduvayense como en el achelense. Pero los datos de la TEP durante este segundo tipo de talla muestran, además, que la activación se extiende a cierta región de la corteza prefrontal: la circunvolución frontal inferior derecha. Decenios de investigación de neurocientíficos como Adam Aron, de la Universidad de California en San Diego, han vinculado esta región al control cognitivo necesario para alternar entre tareas y evitar las respuestas inadecuadas.

Desde entonces hemos corroborado los resultados de la TEP con la RM, que brinda imágenes de mayor resolución. A tal fin, tuvimos que idear el modo en que los voluntarios permanecieran inmóviles. En colaboración con el neurocientífico social Thierry Chaminade, hoy en el Instituto de Neurociencias de la Timone de la Universidad de Aix-Marseille, llevamos a cabo un experimento cuyos participantes no tallaron utensilio alguno, sino que visionaron vídeos de terceras personas empeñadas en esa labor. Este enfoque funciona porque, como han demostrado Chaminade y muchos otros, casi todas las redes neurales que intervienen en la ejecución de acciones también se activan con la mera observación de estas. Aplicando diferentes metodologías, apreciamos sin excepción las mismas respuestas en las áreas visomotoras del cerebro, con un tipo de talla y con el otro. Asimismo, hubo un incremento de la actividad de la circunvolución frontal inferior derecha, pero solo durante el visionado de la fabricación de los útiles del Achelense tardío.

Nuestra conclusión es que la capacidad para adquirir ciertas destrezas físicas complejas debió ser importante en las primeras etapas de la evolución técnica humana durante el Olduvayense, pero que los métodos achelenses exigieron, además, un mayor control cognitivo, otorgado por la corteza prefrontal. De hecho, esta observación encaja bastante bien con el registro fósil, que sitúa uno de los aumentos más rápidos del volumen cerebral de los dos últimos millones de años en el Achelense tardío. Pero este hallazgo no nos reveló qué acontecimiento fue la causa y cuál la consecuencia. ¿Fue la fabricación de herramientas el detonante de la evolución del cerebro de *H. artifex*, o sucedió por azar? Dar respuesta a esta pregunta exige investigar con detenimiento cómo aprende el cerebro a crear herramientas.

APRENDIZAJE Y EVOLUCIÓN

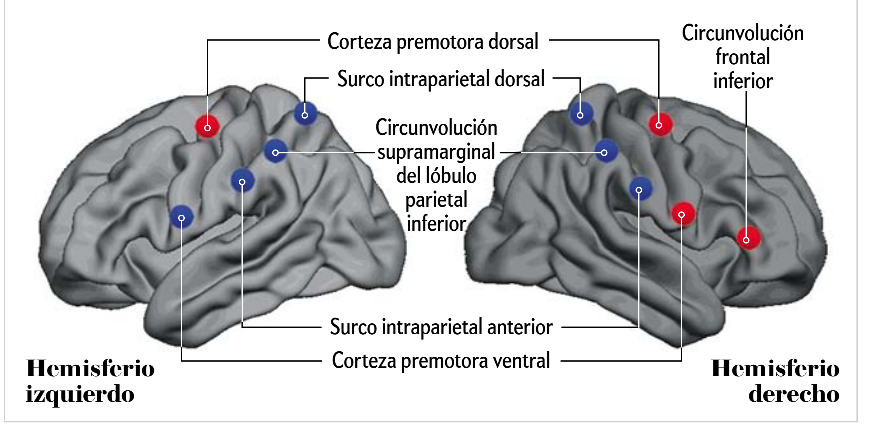
Necesité cerca de 300 horas para adquirir la pericia de los talladores del Achelense tardío de Boxgrove. Tal vez hubiera podido aprender en menos tiempo si hubiese contado con la ayuda de un entendido o hubiese convivido con ellos, pero no estoy seguro. Apenas existen estudios formales del proceso de aprendizaje tras décadas de tallado experimental. Bruce Bradley, profesor de arqueología de la Universidad de Exeter, y tallador experimental desde hace tiempo, me ofreció en 2008 la oportunidad de abordar esta cuestión inédita. Quería enseñar a la siguiente generación de talladores académicos británicos y pensó que me gustaría recopilar algunos datos de neuroimagen para examinar el proceso de aprendizaje; no se equivocó.

Sentía un vivo interés por probar una variante bastante nueva de la RM denominada imagen por tensor de difusión (ITD), que

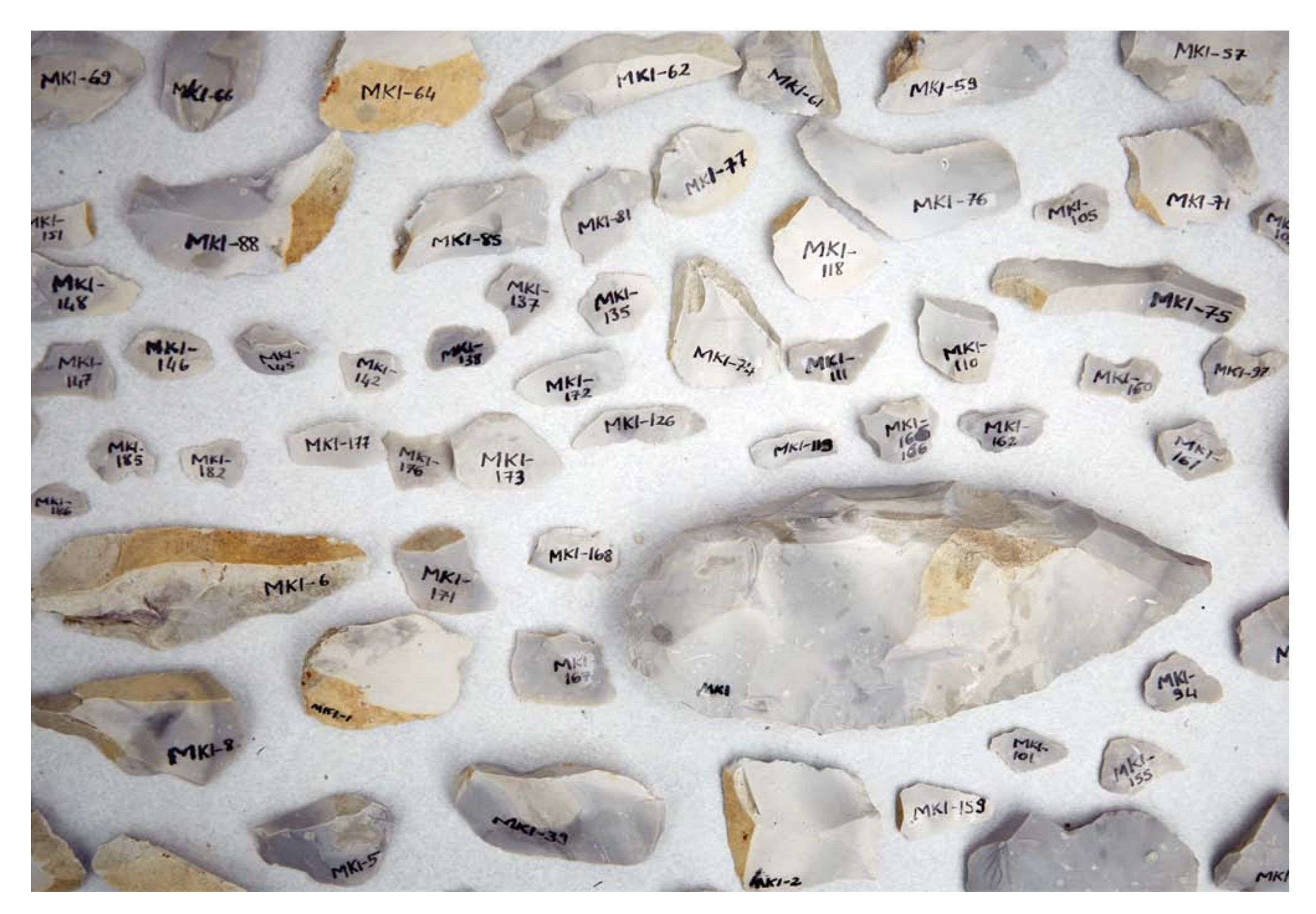
TÉCNICAS DE IMAGEN

El incremento de la capacidad cerebral

Las técnicas de neuroimagen revelan cómo la actividad del cerebro aumenta a medida que la elaboración de las herramientas gana en complejidad. Las exploraciones revelaron las áreas cerebrales que se activan cuando los talladores modernos elaboran un artefacto similar a las sencillas herramientas olduvayenses (de 2,6 a 1,6 millones de años de antigüedad) y las que lo hacen cuando fabrican bifaces achelenses (de 1,6 millones a 200.000 años). Los puntos azules indican las regiones utilizadas mientras cincelan los útiles olduvayenses y achelenses; las rojas también se activan durante la talla de una bifaz achelense.



CORTESÍA DE THIERRY CHAMINADE, INSTITUTE OF NEUROSCIENCES OF TIMONE, UNIVERSIDAD AIX-MARSEILLE



DE TAL PALO, TAL ASTILLA: Los aprendices tallan las bifaces o hachas de mano rodeados de las lascas de sílex arrancadas durante la labor. Cada pieza se etiqueta, se pesa y se mide con el fin de analizar al detalle el proceso de aprendizaje de las habilidades motoras y de planificación.

permite elaborar un mapa de los grupos de fibras de sustancia blanca que sirven como «cableado» del cerebro. En 2004, un grupo encabezado por Bogdan Draganski, entonces en la Universidad de Ratisbona, utilizó la ITD para mostrar los cambios estructurales que se suceden en el cerebro de voluntarios mientras aprenden juegos malabares. Tales cambios ponen en entredicho la idea arraigada de que la estructura del cerebro adulto es relativamente fija.

Sospechábamos que aprender a tallar también requeriría cierto grado de recableado neuronal. Y siendo así, queríamos saber a qué circuitos afectaba. De ser cierta, esperábamos hallar indicios de que la fabricación de herramientas pudiera provocar en los aprendices, a pequeña escala, el mismo tipo de cambios anatómicos que a lo largo de la evolución humana.

La respuesta resultó ser un sí rotundo: practicar la talla aumenta las fibras de sustancia blanca que conectan las mismas regiones frontal y parietal identificadas en nuestros estudios de TEP y RM, incluida la circunvolución frontal inferior derecha de la corteza prefrontal, una región crucial para el control cognitivo. El alcance de los cambios se puede predecir a partir del número de horas de práctica: a más horas, mayor modificación de la sustancia blanca.

Los cambios cerebrales, lo que los neurocientíficos denominan plasticidad, proporcionan la materia prima para el cambio evolutivo, un efecto conocido como acomodación fenotípica. La plasticidad dota a las especies de flexibilidad para probar nuevos comportamientos; para «salir del molde» de su adaptación actual. Si la especie descubre un nuevo truco, lo incorpora a su repertorio de conductas y la carrera evolutiva se pone en marcha: la selección natural favorecerá cualquier variación que mejore su sencillez, eficacia y fiabilidad. Así, nuestro resultado aportó indicios fundados de que la tesis de *H. artifex* era factible y que la fabricación de útiles realmente pudo haber estimulado el cambio cerebral a través de mecanismos evolutivos conocidos.

Con toda esa información, el paso lógico era averiguar si las respuestas anatómicas que habíamos observado podrían explicar ciertos cambios evolutivos concretos del cerebro humano. Los cráneos fósiles no aportan información detallada sobre las variaciones de las estructuras internas del cerebro, así que recurrimos a la mejor opción que nos quedaba: la comparación directa con uno de nuestros parientes vivos más cercanos, el chimpancé.

Por fortuna, ya había pedido la colaboración de Erin Hecht, flamante doctora por la Universidad Emory y hoy en la Universidad estatal de Georgia, para que nos ayudara en el análisis de ITD. En su disertación, Hecht había comparado la neuroanatomía del chimpancé con la humana, por lo que contaba con los datos y la experiencia que precisábamos. Publicado el año pasado, el resultado fue una disección virtual por medio de la ITD de las fibras de sustancia blanca de ambas especies, que en principio detectaría las diferencias en los circuitos relevantes. Nuestras sospechas quedaron confirmadas: los circuitos involucrados en la fabricación de las herramientas que descubrimos en los estudios de TEP, RM e ITD eran más extensos en el hombre

que en el chimpancé, especialmente en las conexiones hacia la circunvolución frontal inferior derecha. Este hallazgo supuso el último eslabón de una cadena de deducciones que había estado trabando desde mis días de estudiante de posgrado, a finales de los noventa, que vinculaba los artefactos prehistóricos con el comportamiento, la cognición y la evolución cerebral. Y reforzaba la vieja idea de que la fabricación de útiles en el Paleolítico ayudó a configurar la mente moderna. Así y todo, está muy lejos de ser el final de la historia.

POR EL OJO DE LA CERRADURA

Me fascinan las herramientas de piedra, pero solo nos brindan una visión muy estrecha de la compleja vida de nuestros antepasados, como si miráramos a través del ojo de una cerradura. Al igual que el geólogo armado con un sismógrafo, el quid de la cuestión radica en convertir esos retazos de conocimiento neurocientífico sobre la fabricación de útiles en un modelo completo de la existencia en la Edad de Piedra.

Si bien los indicios que nos aportan las herramientas líticas son limitados, el resultado podría haber sido peor. Aprender a tallar piedras lleva tanto tiempo como adquirir muchas aptitudes académicas: una asignatura universitaria requiere en principio unas 150 horas de trabajo (diez horas a la semana durante un cuatrimestre de 15 semanas). En la investigación de Bradley, los aprendices dedicaron una media de 167 horas a practicar, y aun así no consiguieron dominar con soltura la talla de las bifaces achelenses. Quizá no deba sentirme tan mal por haber necesitado 300 horas. Pero soportar un régimen de prácticas tedioso y frustrante exige motivación y control de sí mismo, atributos intrigantes desde la perspectiva evolutiva.

La motivación puede venir de fuera, inspirada por un profesor; o de uno mismo, de la anticipación de una recompensa futura. Muchos investigadores consideran que la enseñanza es la característica definitoria de la cultura humana, mientras que anticiparse al futuro es vital para todo, desde las relaciones sociales hasta la resolución de problemas técnicos.

Sin duda, la «zanahoria» motivadora no nos conducirá muy lejos sin la «vara» del autocontrol. Este, entendido como la inhibición de los impulsos contraproducentes, resulta crucial para dominar muchas habilidades cognitivas. De hecho, un estudio reciente dirigido por Evan MacLean, de la Universidad Duke, descubrió que el autocontrol y la planificación a futuro están relacionados con un mayor volumen cerebral en 36 especies de aves y mamíferos. El cúmulo de pruebas aportado por nuestro trabajo vincula el dominio de la fabricación de herramientas con los sistemas cerebrales de autocontrol y planificación a futuro; enlazaría así directamente con el estudio comparado de MacLean sobre la evolución del tamaño cerebral en distintas especies animales.

Además de motivación y autocontrol, el tallador debe conocer a fondo las propiedades de la piedra que va a trabajar, algo nada fácil de conseguir por sí solo. El aprendizaje de la talla es escalonado: la mayor parte del tiempo uno se dedica a practicar y refinar la técnica, pero, de vez en cuando, unos consejos permiten dar un gran paso. A veces es posible descubrir los trucos por uno mismo, pero sin duda es mejor aprenderlos de otros.

Una buena manera de aprender es por medio de la observación. Si le decimos a alguien que es un buen imitador podría tomárselo a mal, pero los psicólogos comparativos reconocen que la capacidad para copiar fielmente es el pilar de la cultura humana. La investigación de Andrew Whiten, de la Universidad Saint Andrews en Escocia, y muchas otras han demostrado que los simios cuentan con cierta aptitud para la imitación, pero nada comparable con la de los niños y los adultos humanos.

¿Es suficiente la imitación por sí misma? Podemos aprender a jugar al ajedrez si observamos con atención el suficiente número de partidas, pero resulta mucho más sencillo si alguien nos explica los pormenores de la estrategia y las tácticas. Intentamos averiguar si esto es aplicable a la fabricación de herramientas y a otras habilidades prehistóricas. En fecha reciente, Thomas Morgan, de la Universidad de California en Berkeley, y sus colaboradores, han ideado un experimento para examinar cómo se transmiten las técnicas de tallado de una persona a otra y han demostrado que es más ventajoso enseñar por medio del lenguaje que mostrando la técnica. Experimentos así son primordiales, porque algún día nos desvelarán el gran misterio del momento y el modo en que surgió el lenguaje humano.

La enseñanza no es el único vínculo posible entre la fabricación de herramientas y el lenguaje. Los neurocientíficos reconocen que la mayoría de las regiones del cerebro humano ejecutan tareas básicas relacionadas con diversos comportamientos. Tomemos, por ejemplo, la clásica área del «habla» descubierta en el siglo XIX por el antropólogo Paul Broca, radicada en la circunvolución frontal inferior izquierda.

Las investigaciones iniciadas a partir de los años noventa del siglo XX han demostrado que el área de Broca no solo interviene en el habla, sino también en la música, las matemáticas y el aprendizaje de las actividades manuales complejas. Con este reconocimiento se ha revitalizado la antigua idea de que la fabricación de útiles, junto con la propensión humana a comunicarse por medio de gestos, pudo servir de base para la aparición del lenguaje. Michael A. Arbib, de la Universidad del Sur de California, ha desarrollado esta idea en profundidad, en particular en su libro de 2012 *How the brain got language* [«Cómo el cerebro adquirió el lenguaje»].

Los resultados de nuestros estudios de neuroimagen sobre la fabricación de útiles líticos nos han llevado a proponer hace poco que los circuitos neurales, entre ellos los de la circunvolución frontal inferior, experimentaron cambios para satisfacer las demandas de la fabricación de útiles paleolíticos y que después fueron aprovechados para crear formas primitivas de comunicación con gestos y, quizá, verbalizaciones. Esta comunicación protolingüística habría estado sujeta a selección, lo que al final propició las adaptaciones que dieron lugar al lenguaje moderno. Los experimentos que estamos llevando a cabo, además de generar una pila de trozos de sílex, nos permitirán poner a prueba esta hipótesis.

PARA SABER MÁS

The sapient mind: Archaeology meets neuroscience. Compilado por Colin Renfrew, Chris Frith y Lambros Malafouris. Oxford University Press; 2009.

Experimental evidence for the co-evolution of hominin tool-making teaching and language. T. J. H. Morgan y otros en *Nature Communications*, vol. 6, art. 6029, 13 de enero de 2015.

Skill learning and human brain evolution: an experimental approach. Dietrich Stout and Nada Khreisheh en *Cambridge Archaeological Journal*, vol. 25, n.º 4, págs. 867-875, noviembre de 2015.

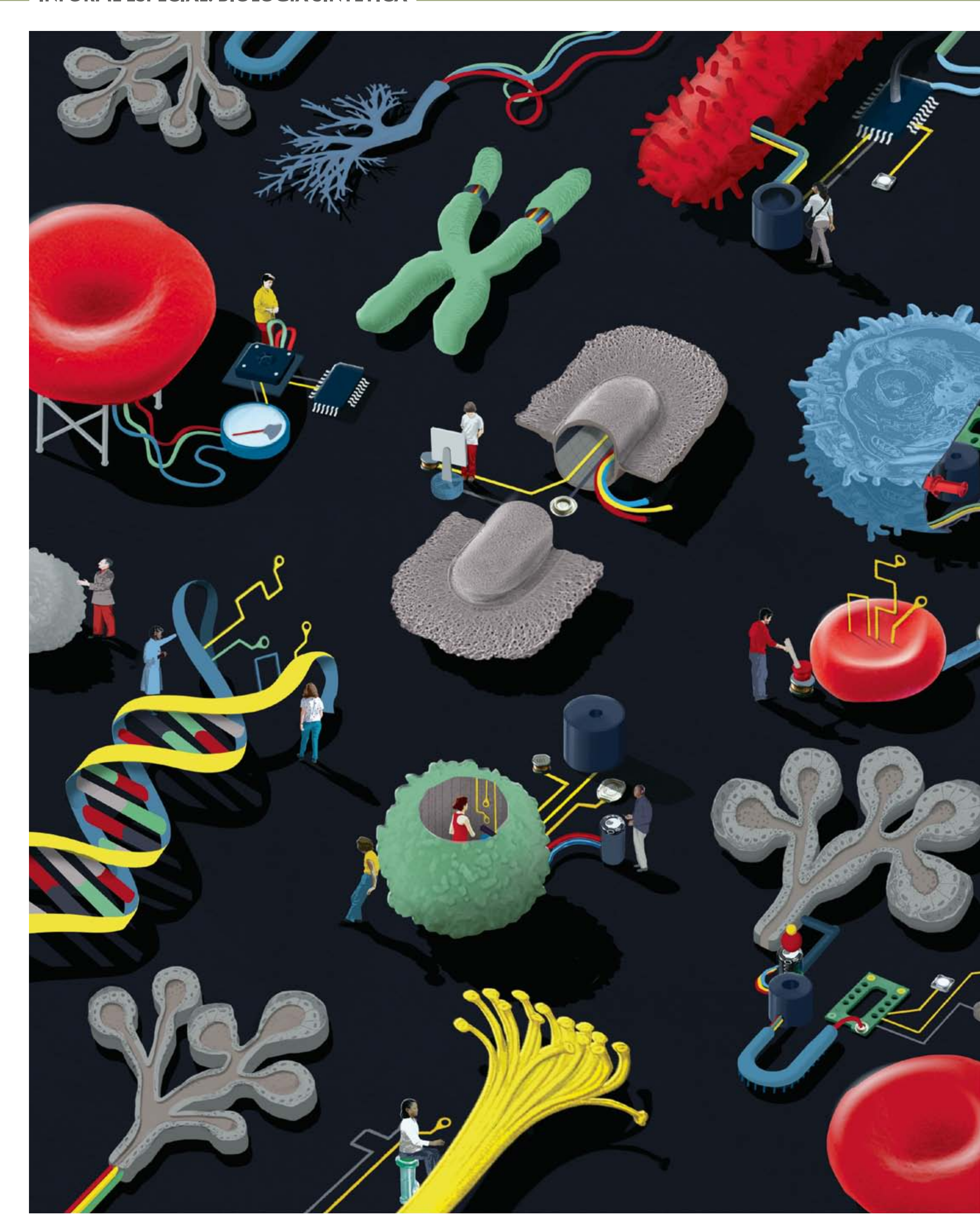
Publicaciones de Dietrich Stout: **https://scholarblogs.emory.edu/stoutlab/publications**

EN NUESTRO ARCHIVO

Polifacético, flexible e ingenioso. Miriam N. Haidle en *IyC*, febrero de 2012.

Los orígenes de la creatividad. Heather Pringle en *IyC*, mayo de 2013.

A golpe de suerte. Ian Tattersall en *IyC*, noviembre de 2014.



BIOINGENIERÍA

COMPUTADORAS BIOLÓGICAS

Los biólogos sintéticos han creado células que operan como ordenadores rudimentarios. Con ellas pronto se podrán diagnosticar y tratar enfermedades, entre otras tareas

Timothy K. Lu y Oliver Purcell



LOS PRIMEROS COMPUTADORES ERAN BIOLÓGICOS: tenían dos brazos, dos piernas y diez dedos. «Computador» era una categoría profesional, no el nombre de una máquina. La profesión desapareció a finales de los años cuarenta del pasado siglo con la creación de las máquinas calculadoras eléctricas y programables. Desde entonces, identificamos los computadores con dispositivos electrónicos.

Así y todo, durante los últimos quince años se está produciendo una especie de renacimiento de la computación en el campo de la biología. Expertos de universidades y de nuevas empresas biotecnológicas creen estar a punto de conseguir las primeras biocomputadoras que dejarán de ser simples artefactos de laboratorio para convertirse en herramientas útiles en el mundo real. Fabricados a base de genes, proteínas y células, tales artefactos incluyen los elementos básicos de la lógica computacional: pruebas de tipo IF/THEN [SI...ENTONCES], operaciones de tipo OR o AND [O o Y], o hasta sencillas operaciones aritméticas. Algunos cuentan con primitivas memorias digitales. Cuando se les introducen los datos biológicos apropiados (*input*), estas computadoras vivas suelen generar casi siempre respuestas predecibles (*output*).

En un lustro las primeras computadoras biológicas podrían servir como sensibles y precisas herramientas para el diagnóstico o el tratamiento de enfermedades como el cáncer, los trastornos inflamatorios y ciertas metabolopatías minoritarias. Nosotros, como otros que están ideando estos sistemas lógicos celulares mediante técnicas de ingeniería genética, concebimos un futuro no muy lejano en que serán lo bastante seguros e inteligentes como para ser usados en la detección y el tratamiento de enfermedades. La tecnología hará posible la fabricación de compuestos químicos complejos, como biocombustibles o fármacos, a través de métodos novedosos más rápidos y económicos que los actuales. Y tal vez también nos permitirán hacer frente a los vertidos tóxicos introduciendo en los ecosistemas contaminados organismos diseñados para detectar y descomponer las toxinas.

Ello no significa que la tecnología de la biocomputación esté avanzada. Todo lo contrario: se halla en pañales. No pensemos en el iPhone; pensemos en Colossus.

Colossus fue una de las primeras computadoras electrónicas programables. Si hubiésemos podido acceder a Bletchley Park, el centro ultrasecreto de descifrado ubicado al norte de Londres donde empezó a operar en 1944, lo hubiéramos visto chirriar sin cesar, con la cinta perforada circulando entre juegos de poleas y envuelto por el suave zumbido de sus 1600 tubos de vacío. Comparado con los ordenadores actuales, Colossus era tan rudimentario que daba risa. Ocupaba una sala entera, de ahí el seudónimo. Solo podía ejecutar un puñado de cálculos distintos y no podía almacenar su propio programa. Los operadores tardaban días o semanas en diseñar, cargar y probar cada nuevo programa, y cada vez habían de recomponer el cableado del ingenio.

A pesar de sus limitaciones, Colossus logró descifrar el sistema de clave que los alemanes usaban para codificar sus mensajes importantes, con lo que ayudó a ganar una guerra mundial. Y décadas más tarde, sus descendientes catapultaron la civilización de la era industrial a la era de la información.

Pues bien, las computadoras celulares más impresionantes construidas hasta la fecha son mucho más sencillas y lentas que Colossus. A semejanza de las primeras computadoras electrónicas digitales, no siempre funcionan, solo pueden ejecutar programas muy sencillos y no se pueden reprogramar si no es dentro de un laboratorio. Pero en ellas vislumbramos algo de ese potencial para transformar la sociedad que tuvo la electrónica digital en sus inicios. En un sistema vivo, hasta los pequeños destellos de inteligencia pueden generar resultados casi mágicos si se saben aprovechar.

Lo más probable es que las computadoras celulares nunca lleguen a desbancar a sus iguales electrónicos u ópticos. La biología no va a ganar ninguna carrera contra la física del estado sólido. Pero la química de la vida posee un potencial único para

SAM FALCONER

interactuar con el mundo natural de modos inalcanzables para los sistemas electrónicos; después de todo, gran parte de nuestro mundo opera gracias a la biología.

Timothy K. Lu encabeza el grupo de biología sintética del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), que integra circuitos de cómputo y de memoria en células vivas, aplica la biología sintética a la resolución de problemas médicos e industriales y construye biomateriales vivos. En 2014 cofundó la empresa de biología sintética Synlogic.



Oliver Purcell es profesor asociado del grupo de biología sintética del MIT. Su labor investigadora abarca desde el diseño de componentes biosintéticos hasta el desarrollo de nuevas estrategias computacionales para el diseño racional de sistemas biológicos.

ENCENDIDO Y APAGADO

En cierto modo, cada célula del organismo es una pequeña computadora. La célula recibe señales (*input*), a menudo en forma de moléculas bioquímicas que se adhieren a su superficie. Procesa esas señales mediante complicadas cascadas de interacciones moleculares. A veces, esas reacciones modifican los niveles de actividad de uno o varios genes del ADN celular; es decir, el grado de «expresión» de cada gen, que primero se transcribe en una molécula de ARN y después se traduce en múltiples copias de la molécula de proteína codificada por él. Esta computación química de carácter analógico genera respuestas (*outputs*), como la producción de hormonas por las células de una glándula, el impulso eléctrico de una neurona o la síntesis de anticuerpos por una célula inmunitaria.

Como biólogos sintéticos, nuestro objetivo consiste en explotar esa capacidad natural de las células para procesar información con el fin de que ejecuten programas diseñados por nosotros. Aspiramos a llegar bastante más allá que la ingeniería genética habitual, que simplemente inactiva un gen, pone en marcha su expresión o inserta uno o dos genes de un ser vivo en las células de otro. Pretendemos manipular con rapidez y fiabilidad el comportamiento de muchos tipos de células (o poblaciones de ellas), casi de la misma forma con que un ingeniero electrónico diseña un circuito integrado sobre una placa: seleccionando componentes estándar de un catálogo y conectándolos entre sí. Por desgracia, la biología difiere de la electrónica en aspectos que acaban por frustrar ese ambicioso objetivo; más adelante volveremos sobre ello.

La disciplina avanza con paso lento pero seguro. Los primeros progresos notorios se produjeron en el 2000. Ese año, James Collins y sus colaboradores de la Universidad de Boston unieron dos genes que se interferían mutuamente para construir un interruptor genético que podía alternar entre dos estados estables, lo cual correspondía a una memoria digital de un bit. Además, un grupo encabezado por Michael Elowitz, a la sazón en la Universidad de Princeton, diseñó mediante ingeniería genética un oscilador rudimentario en una cepa de la bacteria *Escherichia coli*. El microbio modificado brillaba intermitentemente como un árbol de Navidad gracias a un gen fluorescente que se activaba o desactivaba de forma periódica.

En 2003, Ron Weiss, también entonces en Princeton, diseñó un biocircuito que se ajustaba al «principio de Goldilocks» y que hacía que una célula se iluminase cuando la concentración de un compuesto en el ambiente era la correcta: ni excesiva ni escasa. El sistema conectaba entre sí cuatro inversores que cambiaban la señal de ALTA a BAJA, y viceversa.

Pocos años más tarde, Adam Arkin y sus colaboradores de la Universidad de California en Berkeley crearon un tipo de memoria heredable que, una vez activada, recurre a enzimas recombinasas para extraer pequeños fragmentos del ADN, darles la vuelta y volverlos a colocar en su sitio. Cuando la célula portadora se divide, el segmento modificado de ADN pasa a sus descendientes, una característica útil si se tiene en cuenta que muchas bacterias se reproducen en el brevísimo plazo de una o dos horas.

Manipular componentes que ejecutan una sola operación es una cosa; disponer multitud de ellos en un sistema integrado es otra mucho más compleja pero también mucho más útil. Los biólogos sintéticos han logrado crear componentes genéticos que efectúan todas las operaciones básicas del álgebra de Boole propias de la lógica digital (como AND, OR, NOT, XOR). En 2011, dos grupos de investigación insertaron compuertas lógicas en células bacterianas y las programaron para que pudieran comunicarse entre sí mediante «cables» químicos, con lo que crearon, básicamente, computadoras multicelulares.

Posteriormente, Martin Fussenegger, Simon Ausländer y sus colaboradores del Instituto Federal Suizo de Tecnología en Zúrich ensamblaron componentes de ese tipo para generar sistemas aún más avanzados capaces de ejecutar sencillas operaciones aritméticas. Uno de nosotros (Lu), junto con Collins, George Church, de la Escuela de Medicina de Harvard y otros, combinamos unidades de memoria heredables en una cascada para engendrar una cepa recombinante de *E. coli* que podía contar hasta tres. En este sistema, el estado de memoria permanece intacto en las células hijas. Esa es una característica fundamental, puesto que permite recuperar la información almacenada sobre sucesos bioquímicos del pasado al cabo de un tiempo razonable. En principio, sería posible mejorar el contador para alcanzar cifras mayores y registrar sucesos biológicos importantes, como la división o el suicidio de las células.

DETECCIÓN DE ENFERMEDADES

La computación biológica comienza a ser algo más que la mera demostración de un concepto; hoy ya se vislumbran aplicaciones en el mundo real. Durante los últimos años, nuestro grupo y otros hemos descubierto muchas maneras de ensamblar los sensores, los operadores lógicos y los componentes de memoria en circuitos genéticos que pueden llevar a cabo tareas verdaderamente útiles en las células vivas.

EN SÍNTESIS

Los bioingenieros han creado células vivas capaces de contar, sumar, almacenar datos en memorias y ejecutar operaciones lógicas básicas.

Estas biocomputadoras se comunican por medio de señales químicas intrínsecamente ruidosas. También resulta problemático predecir su eficacia antes de su construcción, porque sencillamente no sabemos lo suficiente sobre el funcionamiento de las células.

Algunos laboratorios y empresas de investigación están ensayando aplicaciones, como células que se puedan ingerir para tratar enfermedades metabólicas.

En 2011, un grupo del que formaban parte Weiss, ahora en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), Zhen Xie, hoy en la Universidad de Tsinghua, y Yaakov Benenson, del citado Instituto Suizo de Tecnología, crearon un sistema lógico genético mucho más avanzado que obliga a una célula a autodestruirse en el caso de que albergue una característica cancerosa concreta. El circuito genético supervisa los niveles de seis señales biológicas: diminutos fragmentos de ARN o microARN que regulan la expresión de los genes. Esa media docena de microARN constituye un rasgo distintivo de unas células cancerosas humanas denominadas Hela. Cuando el circuito se encuentra en una de dichas células, activa un interruptor genético citocida que fabrica una proteína que desencadena la muerte celular. En una célula distinta, el circuito permanece inactivo y no induce el suicidio.

Otros grupos de investigación, entre ellos el nuestro, han concebido circuitos de biocomputación que ejecutan operaciones aritméticas básicas (sumas y restas); calculan cocientes o logaritmos; convierten señales digitales de dos bits en respuestas analógicas correspondientes a cierta concentración de una proteína; y graban los estados de ON/OFF de todas sus compuertas lógicas y los transmiten de la célula parental a su descendencia.

El año pasado, nuestro grupo y el de Christopher Voigt, ambos del MIT, desarrollamos un microbio biocomputador que opera en el intestino de un mamífero. Utilizamos ratones como probandos, aunque la bacteria modificada, *Bacteroides thetaiotaomicron*, se halla de forma natural y en gran abundancia en el intestino de la mitad de las personas adultas. Antes, Pamela Silver, de la Escuela de Medicina de Harvard, había modificado genéticamente *E. coli* para adaptarla al intestino del ratón.

El biocircuito convierte la bacteria en un espía, de modo que mientras deambula por el intestino usa parte de su ADN como un cuaderno donde anota si ha tropezado con un compuesto predeterminado. Empleamos compuestos inocuos que dimos de comer a los ratones, aunque resulta igual de sencillo detectar otros, como moléculas tóxicas o biomarcadores que solo se producen cuando el hospedador padece una enfermedad concreta.

Tras ingerir los compuestos, el ratón excreta las bacterias centinelas en sus heces. En aquellas que hayan estado expuestas a la molécula de interés, los circuitos desencadenarán la síntesis de luciferasa, una enzima que brilla en la oscuridad. El brillo delator es tenue, pero visible al microscopio.

No cuesta imaginar que ese tipo de sistemas biocomputerizados puedan ser beneficiosos para las personas que padecen un trastorno intestinal, como la enfermedad inflamatoria del intestino (EII). Pronto lograremos programar bacterias inocuas de nuestra microbiota natural para que traten de localizar signos tempranos del cáncer o de la EII e informen sobre ellos. Un cambio de color en las heces o un compuesto químico detectable con un kit de análisis barato, como las pruebas de embarazo domésticas, harían el resto.

CARENCIAS DE LA BIOCOMPUTACIÓN

Los centinelas celulares que acabamos de describir no precisan mucha potencia de cómputo para mejorar las actuales pruebas de diagnóstico. Basta con un test de tipo IF/THEN, unas pocas compuertas OR o AND y uno o dos bits de memoria persistente. Y es una suerte, porque los ingenieros de biocomputación tienen que superar una larga lista de obstáculos con los que los ingenieros electrónicos nunca han topado.

Por ejemplo, comparados con los gigahercios de velocidad que alcanzan los circuitos electrónicos, la biología funciona a paso de caracol. Cuando suministramos señales de entrada (*inputs*) a nuestros sistemas genéticos, suelen transcurrir horas antes de observar una respuesta (*output*). Por suerte, muchos fenómenos biológicos de interés no operan en escalas de tiempo muy breves. Aún así, los investigadores siguen buscando formas más rápidas de computación en las células vivas.

La comunicación plantea un problema aparte. Evitar la cacofonía es fácil en los ordenadores corrientes: basta con conectar los componentes con cables. Si muchos tienen que compartir un cable, se le da a cada uno un lapso de tiempo para emitir o recibir una señal mediante la sincronización de cada componente con un reloj universal.

Pero en biología no existen cables y no hay reloj que mande. La comunicación intra e intercelular es ruidosa, como ocurre con la radio. Una de las razones es que los componentes biológicos transmiten sus señales a través de compuestos químicos en lugar de cables. Todos los componentes que utilizan un «canal» químico concreto pueden hablar al mismo tiempo. Y lo que es peor, las reacciones químicas que emiten y captan las señales también generan ruido; la bioquímica es un juego de probabilidades. El diseño de sistemas que computen señales fiables, aún siendo ruidosas, plantea un desafío continuo.

Estos aspectos son especialmente inoportunos en el caso de los sistemas de biocomputación basados en la computación analógica, que son la mayoría, pues, al igual que las reglas de cálculo, dependen de valores que varían de manera cuasi continua (la concentración de proteínas o de ARN). Los sistemas digitales, en cambio, procesan señales binarias: ALTO o BAJO, VERDADERO o FALSO. Si bien ello hace la lógica digital más robusta frente al ruido, son muchos menos los componentes capaces de operar de tal modo.

El mayor problema que encaramos es la impredecibilidad, lo que no deja de ser un modo elegante de confesar nuestra ignorancia. Los ingenieros electrónicos disponen de modelos numéricos que predicen, con precisión casi perfecta, lo que hará un circuito recién diseñado antes de construirlo. Los biólogos sencillamente no conocemos lo suficiente el funcionamiento de las células —incluso el de las más sencillas, las bacterias— como para hacer el mismo tipo de predicciones. Avanzamos a tientas, en gran medida a base de prueba y error, y solemos toparnos con que, una vez que nuestros sistemas funcionan, lo dejan de hacer al cabo de un rato. Se desmontan. Y muchas veces ignoramos por qué.

Pero estamos aprendiendo, y una razón de peso para fabricar computadoras a partir de células es que este proceso de montaje, comprobación y corrección de errores de las biocomputadoras puede desvelar sutilezas de la biología y la genética celular que nadie ha observado antes.

EL NACIMIENTO DE UNA NUEVA MÁQUINA

Tal vez pasen décadas antes de vencer todos los obstáculos; algunos, como la escasa velocidad de procesamiento, quizá sean insalvables. No parece probable, pues, que las prestaciones de la biocomputación crezcan al mismo ritmo exponencial que las de las computadoras electrónicas digitales. No esperamos que las biocomputadoras lleguen a ser más rápidas que los ordenadores corrientes a la hora de ejecutar operaciones matemáticas o de manejar datos. Pero los ingenieros de biocomputación están aprovechando la creciente velocidad con la que se descifran y sintetizan moléculas de ADN. Como ocurre con la ley de Moore, esta tendencia reduce cada año el tiempo necesario para diseñar, construir, verificar y refinar los circuitos génicos.

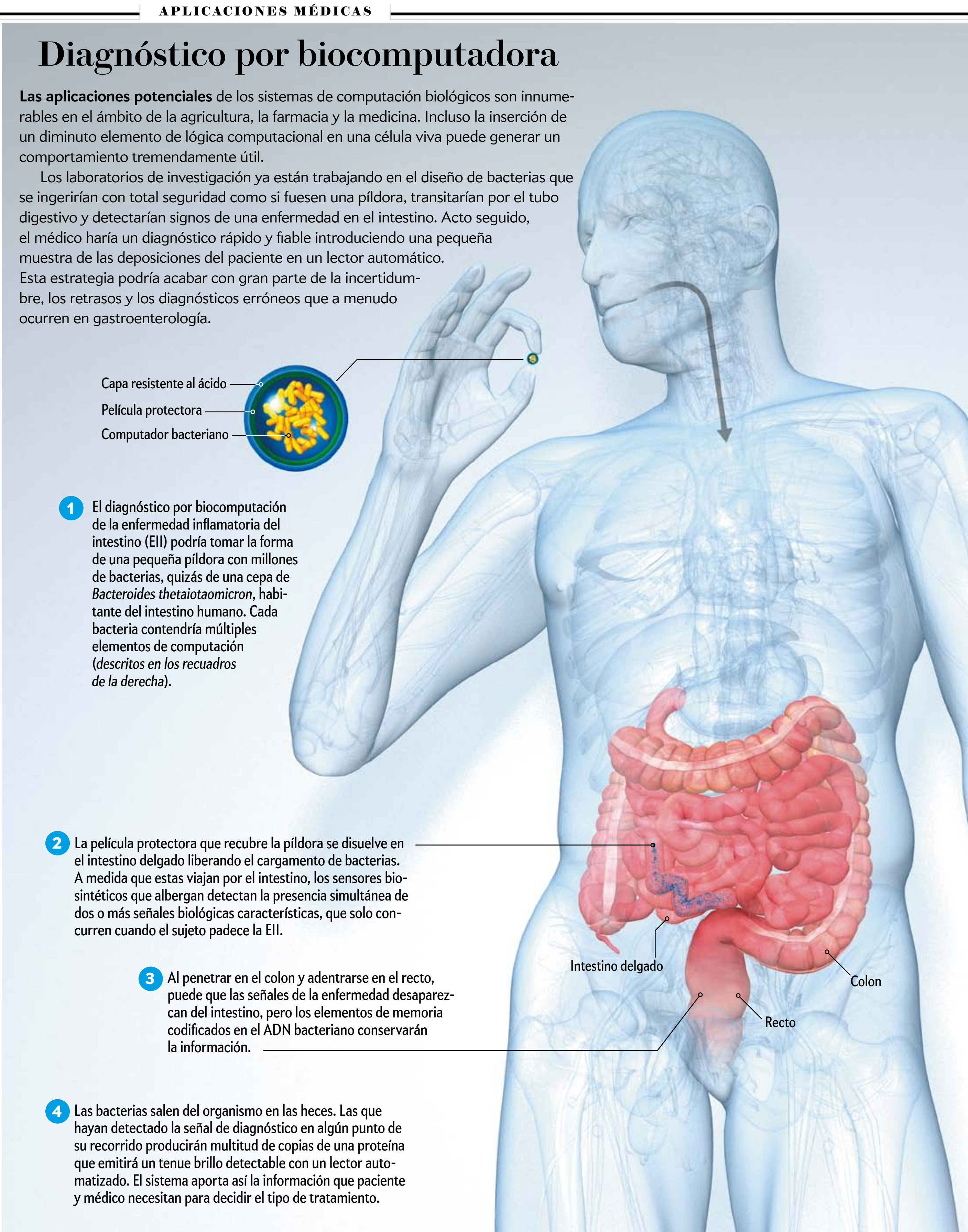
Aunque aún estamos en los inicios, las primeras aplicaciones comerciales de la biocomputación ya están viendo la luz.

APLICACIONES MÉDICAS

Diagnóstico por biocomputadora

Las aplicaciones potenciales de los sistemas de computación biológicos son innumerables en el ámbito de la agricultura, la farmacia y la medicina. Incluso la inserción de un diminuto elemento de lógica computacional en una célula viva puede generar un comportamiento tremendamente útil.

Los laboratorios de investigación ya están trabajando en el diseño de bacterias que se ingerirían con total seguridad como si fuesen una píldora, transitarían por el tubo digestivo y detectarían signos de una enfermedad en el intestino. Acto seguido, el médico haría un diagnóstico rápido y fiable introduciendo una pequeña muestra de las deposiciones del paciente en un lector automático. Esta estrategia podría acabar con gran parte de la incertidumbre, los retrasos y los diagnósticos erróneos que a menudo ocurren en gastroenterología.



1 El diagnóstico por biocomputación de la enfermedad inflamatoria del intestino (EII) podría tomar la forma de una pequeña píldora con millones de bacterias, quizás de una cepa de *Bacteroides thetaiotaomicron*, habitante del intestino humano. Cada bacteria contendría múltiples elementos de computación (*descritos en los recuadros de la derecha*).

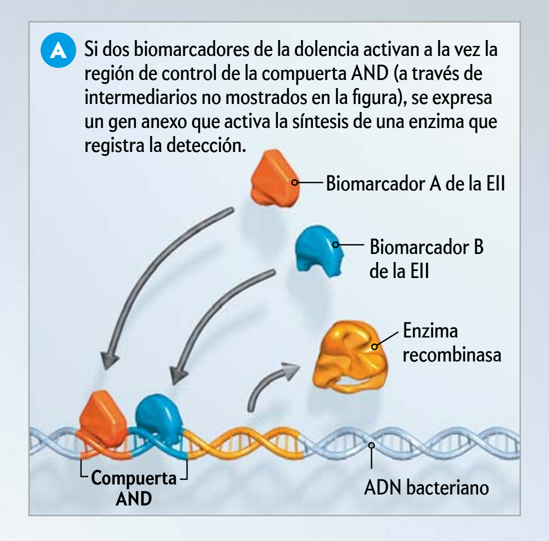
2 La película protectora que recubre la píldora se disuelve en el intestino delgado liberando el cargamento de bacterias. A medida que estas viajan por el intestino, los sensores biosintéticos que albergan detectan la presencia simultánea de dos o más señales biológicas características, que solo concurren cuando el sujeto padece la EII.

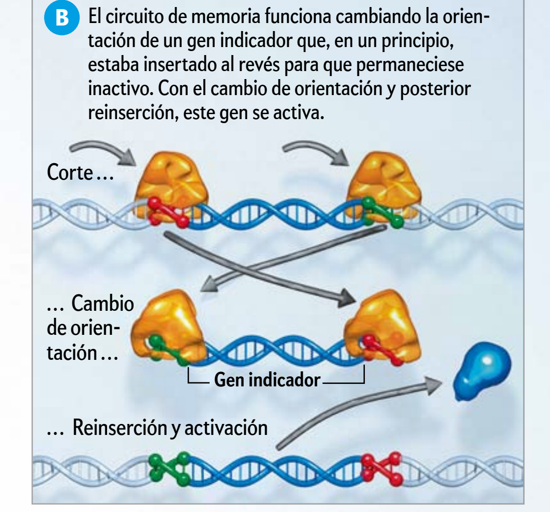
3 Al penetrar en el colon y adentrarse en el recto, puede que las señales de la enfermedad desaparezcan del intestino, pero los elementos de memoria codificados en el ADN bacteriano conservarán la información.

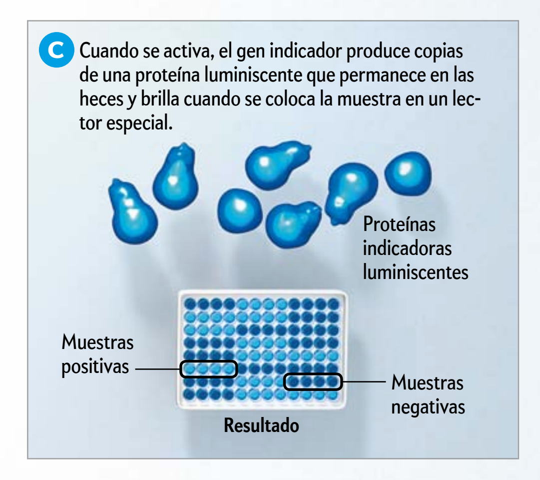
4 Las bacterias salen del organismo en las heces. Las que hayan detectado la señal de diagnóstico en algún punto de su recorrido producirán multitud de copias de una proteína que emitirá un tenue brillo detectable con un lector automatizado. El sistema aporta así la información que paciente y médico necesitan para decidir el tipo de tratamiento.

ASÍ FUNCIONA

Los bioingenieros podrían transformar bacterias vivas en una herramienta para el diagnóstico de la enfermedad inflamatoria del intestino añadiendo unos pocos componentes al genoma bacteriano. Dichos componentes incluyen dos sensores que operan conjuntamente como una compuerta AND del álgebra de Boole, además de un circuito de memoria y un gen que genera una respuesta luminiscente.







BRYAN CHRISTIE

Las células pueden navegar por los tejidos vivos, diferenciar entre señales químicas complejas y estimular el crecimiento y la curación de formas que ningún microchip logrará jamás. Si el diagnóstico por biocomputación funciona bien, el siguiente paso lógico será utilizarla para tratar las enfermedades en el lugar y el momento en que sean detectadas.

Los centros oncológicos ya han empezado a extraer de los pacientes con leucemia ciertas células del sistema inmunitario, los linfocitos T, para insertar en ellos genes que los dirijan contra las células tumorales cuando se reinyectan en el organismo. Ahora, se intentan añadir elementos lógicos al paquete de genes que se inserta en esos linfocitos, con el fin de que reconozcan multitud de rasgos distintivos del cáncer y de dotarlos de interruptores que los sometan al control de los médicos. Con semejante estrategia se empezarán a tratar muchos otros tipos de cáncer [*véase* «Un interruptor para la terapia génica», por Jim Kozubek; Investigación y Ciencia, mayo de 2016].

En 2013, Collins, Lu y otros biólogos fundaron Synlogic, una empresa que comercializará medicamentos elaborados con bacterias probióticas modificadas que se podrán ingerir con total seguridad. En estos momentos están refinando biocomputadoras destinadas a tratar la fenilcetonuria y trastornos del ciclo de la urea, dos enfermedades metabólicas minoritarias pero graves que pueden surgir desde el nacimiento. Los ensayos con animales ya han comenzado y los resultados son alentadores.

A medida que vayamos descubriendo cómo el microbioma influye en la salud humana, hallaremos bacterias que, modificadas genéticamente, actuarán como agentes terapéuticos contra un creciente número de enfermedades; no solo el cáncer, sino también trastornos inflamatorios, metabólicos o cardiovasculares. Con la experiencia adquirida y con un catálogo de componentes cada vez más amplio, los medicamentos «inteligentes» serán más habituales y más potentes. Además, es probable que este tipo de técnicas se extiendan desde la medicina a otras disciplinas. En el sector de la energía, los microbios inteligentes serán eficaces productores de biocombustibles. En la ingeniería química y de materiales, las biocomputadoras servirán para sintetizar sustancias que hoy por hoy son complicadas de fabricar, o para ejercer un control preciso sobre los productos biomanufacturados. En conservación ambiental, monitorizarán en lugares remotos la exposición a las sustancias tóxicas y llevarán a cabo la descontaminación.

La disciplina está evolucionando con rapidez, en sentido literal. Casi con certeza podemos afirmar que aún quedan por descubrir las aplicaciones más asombrosas de la biocomputación.

PARA SABER MÁS

Multi-input RNAi-based logic circuit for identification of specific cancer cells. Zhen Xie y cols. en *Science*, vol. 333, págs. 1307-1322, 2 de septiembre de 2011.

Synthetic analog and digital circuits for cellular computation and memory. Oliver Purcell y Timothy K. Lu en *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 29, págs. 146-155, octubre de 2014.

Programming a human commensal bacterium, *Bacteroides thetaiotaomicron*, to sense and respond to stimuli in the murine gut microbiota. Mark Mimee y cols. en *Cell Systems*, vol. 1, n.º 1, págs. 62-71, 29 de julio de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Células cibernéticas. W. Wayt Gibbs, en *IyC*, octubre de 2001.
Crear vida de la nada. Robert L. Dorit, en *IyC*, marzo de 2014.
Simulación de una célula viva. Markus W. Covert, en *IyC*, marzo de 2014.



LA BIOLOGÍA SINTÉTICA podría constituir una herramienta valiosa para regenerar los ecosistemas amenazados de nuestro planeta y mitigar los efectos del cambio climático.

© JOHAN SWANEPOEL/ISTOCKPHOTO

MEDIOAMBIENTE

HACIA UNA BIOINGENIERÍA DEL PLANETA

La aplicación de métodos de biología sintética al diseño de nuevas interacciones ecológicas podría ayudarnos a evitar el colapso ambiental

Ricard V. Solé, Raúl Montañez y Salva Duran-Nebreda

EN SÍNTESIS

Numerosos ecosistemas de nuestro planeta se hallan en un estado muy frágil, a punto de desaparecer, en gran parte como consecuencia de la presión humana y del cambio climático.

Los autores del presente artículo han desarrollado un modelo teórico en el que plantean la posible regeneración de estos hábitats. En concreto, proponen utilizar organismos sintéticos que, al crear nuevas interacciones ecológicas con las especies autóctonas, permitirían llevar al ecosistema a su situación previa al colapso y, desde esta, a un estado estable.

El modelo incluye barreras genéticas y ecológicas que evitan la dispersión incontrolada en la naturaleza de los organismos modificados.

Ricard V. Solé es investigador ICREA en la Universidad Pompeu Fabra (UPF) y miembro del Instituto Santa Fe, en Nuevo México. Sus investigaciones se centran en los orígenes de la complejidad biológica.

Raúl Montañez es miembro del Laboratorio de Sistemas Complejos de la UPF y del Instituto de Biología Evolutiva (UPF-CSIC). Investiga la complejidad biológica y sus mecanismos de regulación y evolución.

Salva Duran-Nebreda, miembro del laboratorio y del instituto de la UPF arriba mencionados, usa la biología sintética y la modelización para investigar los orígenes de la multicelularidad y el desarrollo.

NUESTRA BIOSFERA HA EXPERIMENTADO A LO LARGO DE SU EXISTENCIA numerosos cambios climáticos abruptos y cinco extinciones masivas que han dejado una marca clara en el registro fósil. Una de ellas, la del final del Pérmico, casi provocó la desaparición de la vida en la Tierra, según apunta el paleontólogo Michael Benton, de la Universidad de Bristol. En la actualidad, los datos parecen indicar que nuestro planeta está sufriendo un nuevo proceso de cambio. A medida que las señales de alarma van en aumento, crece la sensación de que la viabilidad de nuestros ecosistemas puede verse seriamente amenazada por el cambio climático y el deterioro ambiental. La temperatura global está ascendiendo a una velocidad cada vez mayor como consecuencia de la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero. Las especies invasoras, la caza, la contaminación o la pérdida y fragmentación de hábitats están promoviendo la pérdida irreversible de biodiversidad. El empleo desmedido de combustibles fósiles y la presión que ejercen sobre los ecosistemas la explosión demográfica humana y nuestro modelo de consumo son, en gran medida, responsables de estos cambios. Así pues, todo apunta a que, en esta ocasión, podríamos ser la causa principal de la que se prevé que será la sexta gran extinción.

¿Cómo podemos reaccionar ante esta enorme amenaza? Recientemente, nuestro grupo ha propuesto una posible solución basada en la combinación de la ingeniería ecológica y la biología sintética. En concreto, hemos desarrollado una hipótesis que plantea el uso de organismos sintéticos para hacer frente a los principales retos ambientales de nuestro planeta. Nuestra estrategia conllevaría en particular la creación de nuevas interacciones ecológicas que permitieran mantener o recuperar la estabilidad de comunidades ecológicas frágiles. Con ella podría evitarse el colapso de los ecosistemas degradados, mitigar la acumulación de los gases de efecto invernadero o eliminar contaminantes de distintos hábitats. Nuestro modelo incluye, además, barreras genéticas y ecológicas para impedir la dispersión de los organismos modificados, que serían inviables fuera de las condiciones estrictas para las que se han creado.

Hemos bautizado nuestra idea con el nombre de «terraformación». El concepto, que nació en 1942 en la literatura de ciencia ficción, se propuso más tarde como una forma de modificar el clima de otros planetas, en particular el de Marte. James Lovelock sugirió, por ejemplo, la inyección en el planeta de gases de efecto invernadero, como los clorofluorocarburos, para provocar un aumento de las temperaturas y la liberación del agua congelada en el permafrost marciano. Dado que estas propuestas tienen que ver con crear condiciones similares a las de la Tierra, hablamos de terraformación para referirnos a modificaciones artificiales de hábitats destinadas a favorecer la presencia de sistemas vivos (tal y como los conocemos).

A diferencia de Marte, que puede ser un planeta biológicamente inerte, la terraformación de nuestro planeta consistiría en modificar una biosfera ya existente introduciendo pequeñas variaciones en las interacciones ecológicas con el fin de evitar el colapso del ecosistema, o al menos paliar alguno de los efectos del cambio climático. Para ello nos apoyamos en dos ideas clave: la primera es que, mediante el conjunto apropiado de genes y mecanismos de regulación, podemos ampliar el fenotipo de algunos microorganismos autóctonos; la segunda se basa en el conocimiento sobre cómo las dinámicas cooperativas entre organismos pueden modificar los flujos de materia y energía a través de las redes ecológicas, lo que favorecerá la construcción de un nicho ecológico estable y promoverá su resiliencia.

PERSPECTIVA ACTUAL

Para hacer frente a las amenazas ambientales, durante las últimas décadas se han desarrollado numerosas ideas (no excluyentes entre sí) que abarcan desde una profunda revisión y cambio de nuestros hábitos de consumo hasta intervenciones activas sobre el clima. La modificación de nuestros hábitos requiere un ajuste profundo del sistema económico actual, el establecimiento de acuerdos internacionales y un cambio social de gran calado, así que parece mucho más fácil apostar por la intervención sobre un problema ambiental dado o sobre sus efectos. En este contexto, hay dos grandes retos, relacionados entre sí, que debemos abordar: reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero y preservar la estabilidad de ecosistemas clave cuya diversidad se halla amenazada.

La geoingeniería, basada en el desarrollo de métodos de modificación del clima a escala regional e incluso global, se postula como una posible estrategia de intervenir sobre el clima. En ella se contempla, entre otras opciones, inyectar aerosoles en la estratosfera, crear nubes capaces de reflejar la luz solar o secuestrar el dióxido de carbono en estratos profundos.

Por otra parte, existen técnicas que utilizan sistemas vivos (bacterias, plantas u hongos) seleccionados o diseñados para mejorar el estado de un ecosistema que se ha deteriorado. Estas técnicas se conocen como métodos de biorremediación. Entre sus objetivos figuran la eliminación de contaminantes como los metales pesados (el mercurio) o la degradación de moléculas orgánicas como el tolueno o los vertidos de petróleo en el océano. La biorremediación se basa en la liberación de organismos que pueden o que necesitan emplear las sustancias contaminantes para su crecimiento. De este modo, una vez liberados, proliferarán a expensas de un recurso que es tóxico para otras especies hasta completar el proceso de limpieza.

Aunque ambas formas de abordar daños ambientales resultan relevantes y en la actualidad se hallan en desarrollo, ninguna de ellas, tal y como están concebidas, permite hacer frente a los retos que planteábamos más arriba. La geoingeniería puede mitigar, a largo plazo y con un elevado coste económico, el exceso de dióxido de carbono o metano en la biosfera; pero, mucho antes de alcanzar los niveles deseados, algunos ecosistemas clave colapsarán, junto con las sociedades humanas que dependen de ellos para sobrevivir. Por otra parte, muchos de estos ecosistemas en peligro no están contaminados, sino que precisan una modificación en su organización que va más allá de la simple biorremediación mediante la introducción de un determinado organismo.

Además, la celeridad con la que pueden darse algunos cambios en el futuro hace que debamos afrontar los riesgos sin más demora. Llegar a una solución, y hacerlo a tiempo, tal vez exija un cambio de estrategia, una nueva visión del problema en la que la biología sintética y la ingeniería ecológica se aúnen, para rediseñar nuevos elementos y relaciones que permitan restablecer el correcto funcionamiento de los ecosistemas degradados, de modo que recuperen su productividad y funcionalidad.

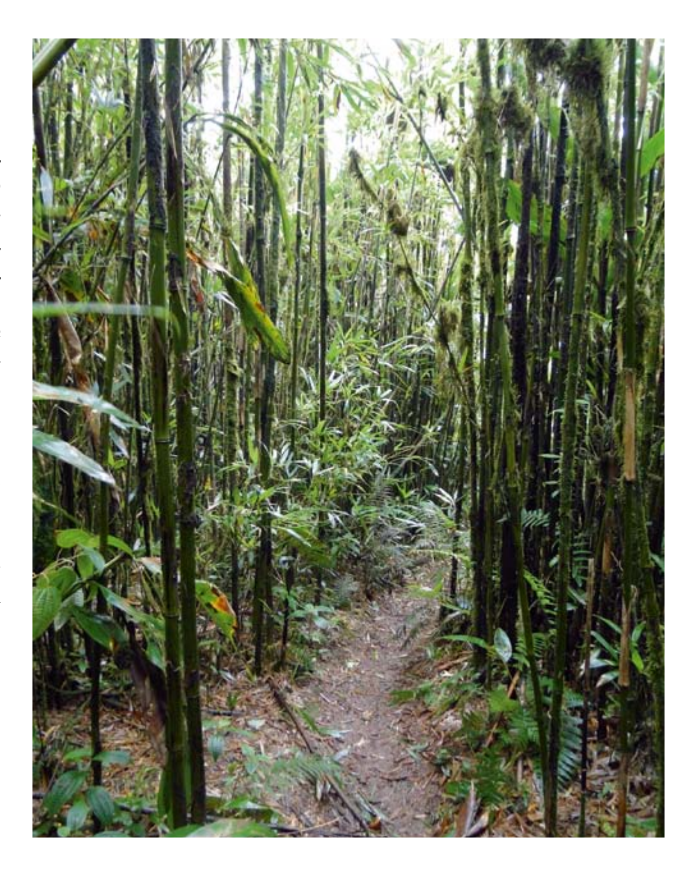
TRANSICIONES ABRUPTAS

En las últimas décadas, los estudios sobre la estabilidad de los ecosistemas, tanto terrestres como marinos, han puesto de manifiesto que su respuesta ante las variaciones del entorno puede resultar catastrófica. El Sáhara, que actualmente asociamos a un desierto sin vida, nos ofrece un ejemplo de que este tipo de catástrofes han ocurrido en el pasado y muy probablemente se repetirán en el futuro. Hace algo más de 5500 años la región se hallaba cubierta por vegetación y estaba dominada por ecosistemas ricos en especies. Pero, en menos de un siglo, se deterioró hasta una situación de colapso irreversible, pese a que variables climáticas como la insolación habían ido cambiando de forma modesta.

En teoría ecológica, decimos que estos sistemas son biestables: existen dos estados posibles, muy distintos, separados por una frontera que está definida por un punto crítico. En el caso de la desertificación, el estrés ambiental (asociado a un valor umbral de intensidad de pastoreo o de precipitaciones) es el parámetro clave que determina la transición entre un estado con cubierta vegetal y otro desértico. ¿Cuál es el origen de estos cambios bruscos? Como suele ocurrir en ecología, las interdependencias entre las especies y sus efectos sobre las variables ambientales están lejos de seguir un esquema lineal, en el que la respuesta es proporcional a la causa. En general, los mecanismos biológicos de modificación del nicho ecológico estabilizan el sistema y lo alejan del estado que, de otro modo, determinarían las variables puramente ambientales. Pero, una vez se superan ciertos límites (puntos críticos), la estabilidad se pierde por completo y el sistema pasa a estar controlado por las variables abióticas.

La ecología de los sistemas biestables se conoce bien, gracias a lo cual se han podido desarrollar modelos que permiten simular o predecir su comportamiento a largo plazo cuando se modifican distintos parámetros. Si empleamos estos modelos para representar el porcentaje de suelo cubierto por plantas a medida que aumenta el estrés sobre el sistema, observamos que la vegetación se va reduciendo lentamente conforme se intensifica el estrés; pero, a partir de cierto nivel de estrés, se produce una caída abrupta y acelerada de la cubierta vegetal hasta su extinción. De darse esta transición, resultaría además irreversible: aunque lográramos restablecer las condiciones anteriores, se necesitaría una reducción muy notable del estrés para posibilitar la vuelta a un estado con vegetación.

Los estudios indican que algunos ecosistemas bien conocidos, entre ellos los de la región del Kalahari y algunos de la cuenca mediterránea, podrían estar mostrando indicios de acercarse a esos puntos críticos. La importancia de los ecosistemas áridos es enorme: constituyen casi el 40 por ciento de la superficie de todos los ecosistemas terrestres y sostienen un porcentaje similar de población humana, que en la mayoría de los casos contribuye a aumentar la presión sobre la cubierta vegetal como consecuencia del pastoreo. Dado lo apremiante de la situación, ¿cómo podemos devolver estos sistemas a unas condiciones que favorezcan su conservación y, a su vez, nuestra supervivencia?



LA ISLA DE ASCENSIÓN ofrece un ejemplo histórico de terraformación. En el pasado desprovista de vegetación, hoy incluye en su zona más alta (Green Mountain) un bosque nuboso. Este puede considerarse un ecosistema «sintético»: la combinación de plantas que coexisten en él no se da en ningún otro lugar y se debe a las especies exóticas elegidas para la reforestación.

© RADEK6/ISTOCKPHOTO

Para resolver este problema, es posible que necesitemos formular una nueva aproximación interdisciplinar que incluya introducir modificaciones en la arquitectura de las interacciones entre especies.

EL PRIMER ECOSISTEMA SINTÉTICO

La transformación de los ecosistemas es algo que está ocurriendo de forma constante y generalizada, y ello no solo afecta a la presencia o ausencia de organismos. Tiene también un gran impacto en los procesos de transferencia genética horizontal y en la reorganización de las redes de interacciones entre especies.

Cuando nos planteamos modificar un ecosistema, inmediatamente salta en nosotros una señal de alarma: ¡no podemos poner en peligro la naturaleza! Tendemos a pensar que los ecosistemas que nos rodean son de algún modo «primigenios»; o que tenemos el compromiso de retornarlos a su estado «original» a partir de lo que nos queda de ellos. Muy a menudo no se tiene en cuenta que su organización es ciertamente distinta de la de los ecosistemas que los precedieron, aunque no por ello resulte poco diversa o carente de interés.

Un ejemplo histórico de ingeniería de ecosistemas que resulta interesante y a la vez alentador lo ofrece la isla de Ascensión. Este territorio localizado en medio del Atlántico sufrió una pérdida notable de biodiversidad después de que los marinos portugueses introdujesen cabras en él en el siglo XVI. La degradación llegó a tal punto que, cuando el Beagle llegó a Ascensión en 1836, un joven Charles Darwin la describió como «un trozo de ceniza». Impulsado por el botánico Joseph Hooker, se inició a mediados del siglo XIX un programa de introducción de especies foráneas, especialmente árboles, con la hipótesis de que estos ayudarían a atrapar más humedad y permitirían sustentar un ecosistema más diverso. El resultado final del que podríamos llamar el primer ecosistema sintético fue espectacular. Hacia finales del mismo siglo se habían establecido en Ascensión un buen número de especies que jamás antes habían coincidido en un mismo ecosistema (como pinos, bambú y eucaliptos), formando un bosque nuboso tropical. Veinte años después de la intervención, aquella isla en la que era imposible hallar un manantial tenía un aporte de agua excelente. De ello se desprende la importante lección de que los humanos también pueden tener un impacto positivo sobre los ecosistemas y que estos pueden emerger a partir de condiciones totalmente artificiales y formar comunidades complejas. Lo que ocurrió en Ascensión constituye un precedente que nos sirve para ilustrar nuestra idea de la terraformación de la Tierra para evitar un colapso ambiental a gran escala.

El empleo de organismos genéticamente modificados es un tema socialmente controvertido. Su uso se limita actualmente a la agricultura intensiva, con escasas excepciones en otros ámbitos, como la cría del salmón. Por otra parte, diversos estudios han demostrado la eficiencia de utilizar cepas microbianas seleccionadas artificialmente para llevar a cabo tareas de descontaminación, pero los ensayos sobre esta aplicación en campo abierto son aún limitados. ¿Podríamos emplear organismos diseñados para rescatar un ecosistema en peligro de colapso?

POSIBLES CASOS DE TERRAFORMACIÓN

Tomemos como ejemplo la aplicación de la terraformación en los ecosistemas semiáridos, cuyo problema principal es, además del sobrepastoreo, la baja retención de agua en el suelo. En estos hábitats, el sustrato clave responsable de mantener y favorecer la presencia de vegetación es la llamada costra del suelo [*véase* «Espartales ibéricos», por Fernando T. Maestre; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2008]. Esta constituye un complejo ecosistema en el que numerosas especies, como briófitos, líquenes, hongos y bacterias, interactúan entre sí formando una red compleja pero que se muestra frágil ante las actividades humanas. Supongamos ahora que logramos modificar algunas de las especies presentes en estas costras de forma que mejoren la calidad del suelo, ya sea porque segregan alguna molécula higroscópica (capaz de retener agua), o tal vez porque fijan mejor el nitrógeno atmosférico, todo lo cual puede ayudar a otras especies a proliferar. En ambos casos, el objetivo consiste en crear una dependencia mutua entre la cubierta vegetal que queremos preservar y la especie del suelo que modificamos. Esta última llevará a cabo la función mejorada, lo que revertirá en un mayor desarrollo de las plantas, que, a su vez, favorecerán las condiciones del suelo a su alrededor. Estos cambios no tienen por qué ser drásticos (de hecho, puede que las propias limitaciones del medio árido lo impidan), pero basta con que logren mantener la vegetación estabilizada. De ser así, evitarían que el ecosistema alcanzara el punto crítico y su declive hacia el estado desértico.

La biología sintética puede emplearse en hábitats fuertemente transformados por el ser humano. De hecho, la mayoría de los ecosistemas que existen en la actualidad sobre nuestro planeta constituyen ecosistemas noveles que son el resultado de cambios antropogénicos. Al igual que en el ejemplo de la isla de Ascensión, se trata de hábitats en los que, por diferentes causas, se han reunido especies exóticas con especies locales que compiten o cooperan entre sí y que, en conjunto, han creado nuevas comunidades ecológicas.

Suele pensarse en una especie exótica como una contribución negativa a la biología autóctona. Sin embargo, sabemos que algunas especies invasoras han permitido mejorar la estabilidad del ecosistema e incluso favorecer una mayor diversidad. En el extremo de los ecosistemas noveles, hallaríamos los vertederos alrededor de grandes centros urbanos, las explotaciones mineras o los sistemas de alcantarillado, así como las numerosas manchas de plástico marino localizadas en los vórtices oceánicos de todo el planeta.

Los organismos sintéticos podrían desempeñar diversas funciones en los mares contaminados por plásticos. Podrían descomponer estos u otros materiales de difícil degradación (con lo que llevaríamos a cabo un proceso de biorremediación), pero también podrían potenciar directa o indirectamente la fijación de biomasa en el ecosistema o promover la estabilidad de este mediante nuevas interacciones con otras especies (con lo que nos acercaríamos a la geoingeniería). La viabilidad de este escenario parece confirmada por la observación de que, de forma natural, han aparecido cepas de microorganismos que degradan activamente el plástico. Así lo ha demostrado el trabajo de Shosuke Yoshida, del Instituto de Tecnología de Kioto, y sus colaboradores, que han identificado una nueva bacteria, *Ideonella sakaiensis*, que emplea un derivado del poliestireno como fuente básica de carbono y energía.

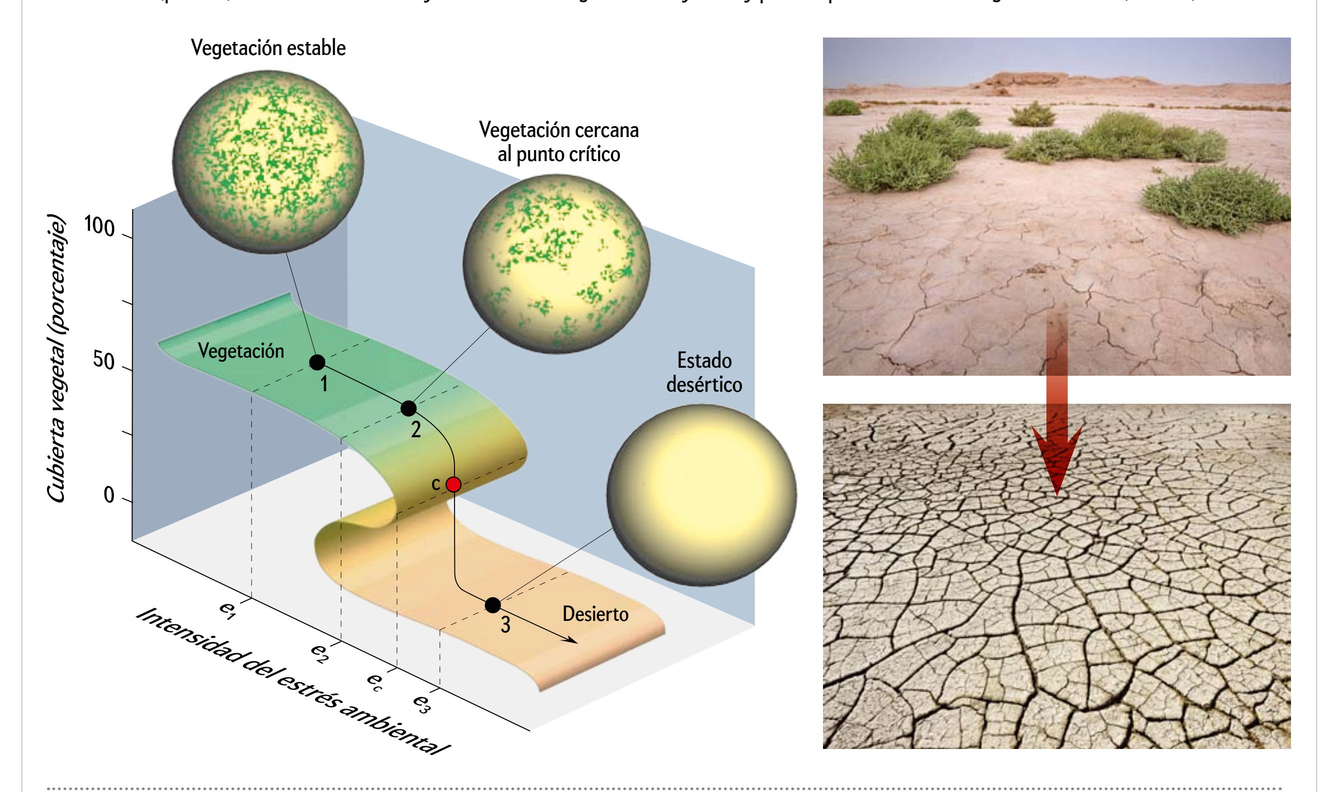
La biología sintética nos ayudaría a abordar de forma racional numerosos retos ambientales mediante la introducción de organismos modificados que permitan resolver este tipo de situaciones, pero también permitiría incorporar mecanismos de control y estabilización. Cuando el organismo sintético no operara de forma eficiente, o dejara de aportar alguna ventaja (en el caso del sistema árido, cuando se hubieran alcanzado ciertas condiciones de humedad debido a la mayor cubierta vegetal, y en el caso del plástico, cuando se hubiera consumido

Evitar el colapso de un ecosistema

Los ecosistemas áridos, sometidos a un fuerte estrés ambiental a causa de la escasez de agua y el sobrepastoreo, se caracterizan por una fragilidad extrema. Su respuesta ante el deterioro de las condiciones puede ser brusca y dar lugar al colapso y a la desertificación. La biología sintética podría ayudar a evitarlo al restablecer la humedad edáfica y facilitar la regeneración vegetal.

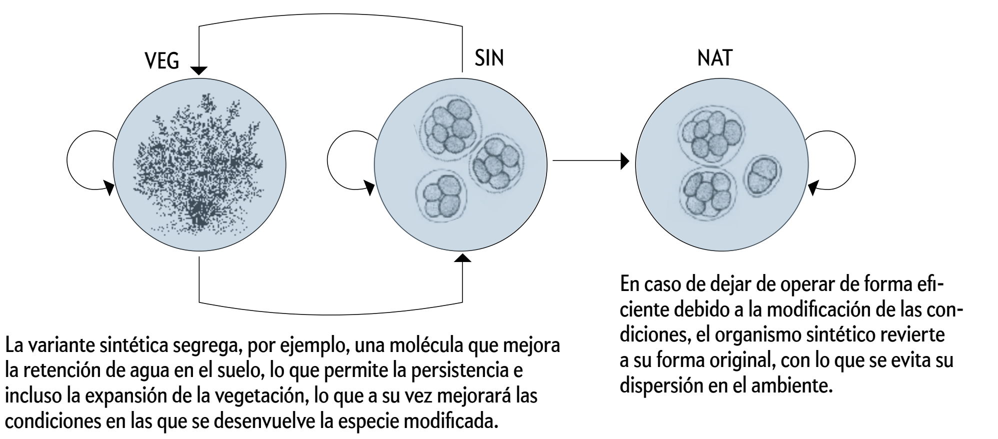
Transición crítica

La desertificación puede representarse gráficamente como la pérdida de cubierta vegetal con el aumento del estrés ambiental (intensidad de forrajeo o estrés hídrico) (*izquierda*). Al principio se atraviesan de forma continua distintos estados (puntos *1* y *2*) que permiten la presencia de vegetación. Pero, a partir de cierto punto crítico (*c*), el ecosistema experimenta un cambio súbito que implica el colapso hacia un estado desértico (punto *3*). Esta transición brusca ya se ha dado en algunas zonas y es muy posible que vuelva a tener lugar en el futuro (*derecha*).



Reparación sintética

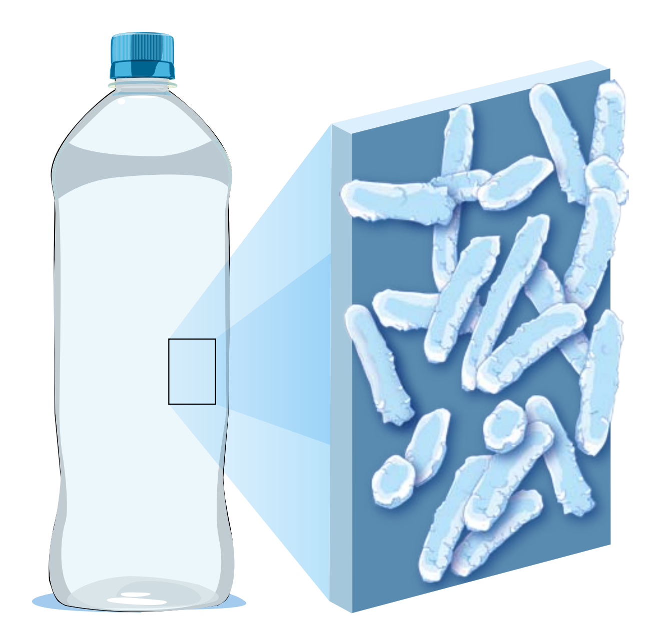
Una forma de impedir esta transición catastrófica consistiría en emplear una especie microbiana del suelo, como el alga unicelular *Nostoc*. A partir de la variante natural (*NAT*) de esta alga puede crearse una variante sintética (*SIN*) capaz de establecer o reforzar una interacción mutualista con la vegetación (*VEG*).



La variante sintética segrega, por ejemplo, una molécula que mejora la retención de agua en el suelo, lo que permite la persistencia e incluso la expansión de la vegetación, lo que a su vez mejorará las condiciones en las que se desenvuelve la especie modificada.

En caso de dejar de operar de forma eficiente debido a la modificación de las condiciones, el organismo sintético revierte a su forma original, con lo que se evita su dispersión en el ambiente.

CORTESÍA DE LOS AUTORES (*ilustraciones*); © XIFOTOS/ISTOCKPHOTO; © BJDLZX/ISTOCKPHOTO (*fotografías*)



EN LOS SUSTRATOS PLÁSTICOS se ha descubierto una bacteria, *Ideonella sakaiensis*, que logra vivir del plástico de tipo PET al incorporar sus componentes (etilenglicol y ácido tereftálico) como biomasa. De este modo, no solo elimina el plástico del entorno, sino que al mismo tiempo retira CO_2 de la atmósfera. Además, su desarrollo queda confinado a aquellos lugares donde hay estos plásticos, por lo que se evita su dispersión a otros hábitats. Este sistema puede servir de modelo para crear ecosistemas sintéticos en otros sustratos, de manera que contribuyan a procesar otros desechos o sustancias contaminantes.

todo el material), simplemente revertiría a su forma original. Ello supone una barrera genética y también ecológica a la dispersión de los organismos modificados, que serían inviables fuera de las condiciones estrictas del sistema para el que se han diseñado.

Estos son solo dos ejemplos de un conjunto bien definido de formas de diseñar circuitos ecológicos de terraformación. Todos ellos implican el empleo de una especie modificada que aporta una función de interés ecológico, desde el procesamiento de contaminantes hasta la mejora de la resistencia al estrés, y evita así el colapso del ecosistema.

POSIBILIDADES Y OBSTÁCULOS

En ecología, se considera que un ecosistema se ha recuperado cuando este alcanza un equilibrio en la composición de especies, la estructura espacial y los procesos dinámicos [*véase* «Reforestación», por P. J. Rey y J. M. Alcántara; Investigación y Ciencia, febrero de 2011]. En este sentido, nuestro objetivo no es simplemente diseñar nuevas especies que desarrollen una función biorremediadora, sino crear sistemas ecológicos estables y autosostenibles donde las estrategias mutualistas y de facilitación de nicho nos permitan expandir las poblaciones de organismos capaces de paliar los efectos derivados de actividades humanas.

La ventaja de emplear una conexión cooperativa entre dos especies es que, según indican nuestros modelos teóricos, el sistema diseñado queda confinado a llevar a cabo una función bien definida en un contexto ecológico que lo limita. El grado de dependencia del organismo sintético desemboca así en un control doble: genético y ecológico.

Se trata de una estrategia ambiciosa que, sin duda, requerirá estrategias interdisciplinares y la creación de conocimiento a caballo entre la ecología de poblaciones, la ingeniería de ecosistemas, la biología sintética y la genética molecular. La propuesta choca frontalmente con las posiciones conservadoras que abogan por la restauración de los ecosistemas a sus estados primigenios y la eliminación, cuando sea preciso, de las especies que se consideran exóticas. Pero hay que admitir que la inmensa mayoría de los hábitats que nos rodean, incluso los cada vez más reducidos puntos calientes de biodiversidad, que debemos preservar a toda costa, han experimentado un mayor o menor impacto antropogénico. Como señala la bióloga y experta en temas ambientales Emma Marris, devolverlos a su estado anterior «es simplemente demasiado difícil».

El planteamiento que defendemos ya se ha puesto en práctica con el diseño de algunos ecosistemas sin el empleo de organismos sintéticos. Por ejemplo, Margaret Palmer, experta en restauración de ecosistemas de la Universidad de Maryland, ha liderado la visión de que la restauración de un ecosistema histórico del que apenas sabemos nada (y que posiblemente sea irrecuperable) debe ser reemplazada por el diseño y la ingeniería, que darán lugar a nuevos ecosistemas que tendrán poco que ver con sus predecesores [*véase* «Límites de la restauración de humedales», por David Moreno Mateos; Investigación y Ciencia, agosto de 2015]. Estos ecosistemas artificiales pueden ser de hecho más diversos y eficientes.

Cabe preguntarse si las ventajas que ofrecería la terraformación basada en la biología sintética, que correspondería a una forma de bioingeniería, podrían reemplazar a las que aportaría la geoingeniería. Sin duda, una ventaja clara (y una diferencia esencial) es que la bioingeniería implica construir máquinas que están vivas y se multiplican, con lo que extienden su acción a medida que se propagan por el sistema que deseamos cambiar. Y ante el recelo que pueden suscitar las comunidades sintéticas, es preciso señalar, una vez más, que estas no tienen por qué ser menos interesantes o irrelevantes que las que etiquetamos como «naturales». Por último, no olvidemos que —igual que ocurrió en Ascensión— tras unas décadas de desarrollo puede emerger un nuevo ecosistema de gran complejidad. Si realmente deseamos preservar la biodiversidad de nuestro planeta para las generaciones venideras, es muy posible que lo logremos solo si combinamos la protección de los hábitats que se han conservado hasta hoy con la creación de condiciones adecuadas para la emergencia de los ecosistemas artificiales que también formen parte de nuestro futuro.

PARA SABER MÁS

Bioengineering the biosphere. Ricard Solé en *Ecological Complexity*, vol. n.º 22, págs. 40-49, 2015.
Synthetic circuit designs for earth terraformation. Ricard V. Solé, Raúl Montañez y Salva Duran-Nebreda en *Biology Direct*, DOI: 10.1186/s13062-015-0064-7, julio de 2015.
A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Shosuke Yoshida et al. en *Science*, vol. 351, n.º 6278, págs. 1196-1199, marzo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

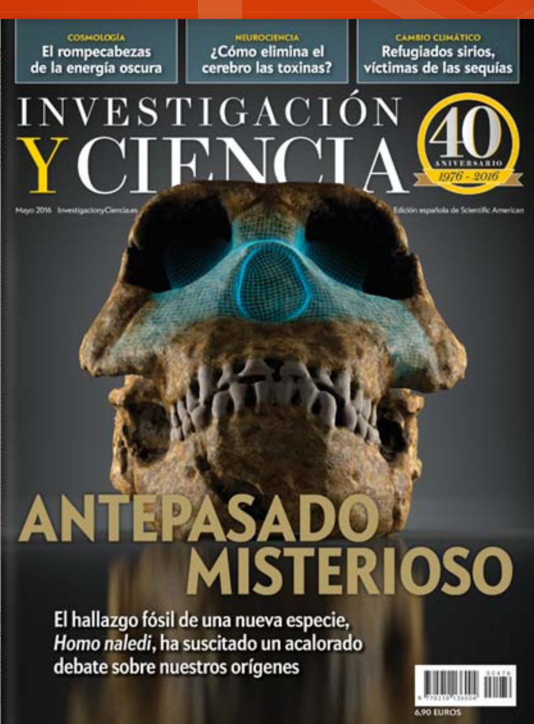
Límites de un planeta sano. Jonathan Foley en *IyC*, junio de 2010.
Ecosistemas al borde del colapso. Carl Zimmer en *IyC*, diciembre de 2012.
Las matemáticas de la biodiversidad. Jordi Bascompte en *IyC*, octubre de 2013.

CORTESÍA DE RAÚL MONTAÑEZ

Accede a la HEMEROTECA DIGITAL

TODAS LAS REVISTAS DESDE 1990







Suscríbete y accede a todos los artículos

PAPEL
Elige la modalidad mixta y recibirás también las revistas impresas correspondientes al período de suscripción

ARCHIVO
Encuentra toda la información sobre el desarrollo de la ciencia y la tecnología durante los últimos 25 años

DIGITAL
Accede desde cualquier ordenador o tableta al PDF de más de 8000 artículos elaborados por expertos

www.investigacionyciencia.es

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

por María Valladolid y Manuela Gallardo

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Las plumas y la salud de las aves

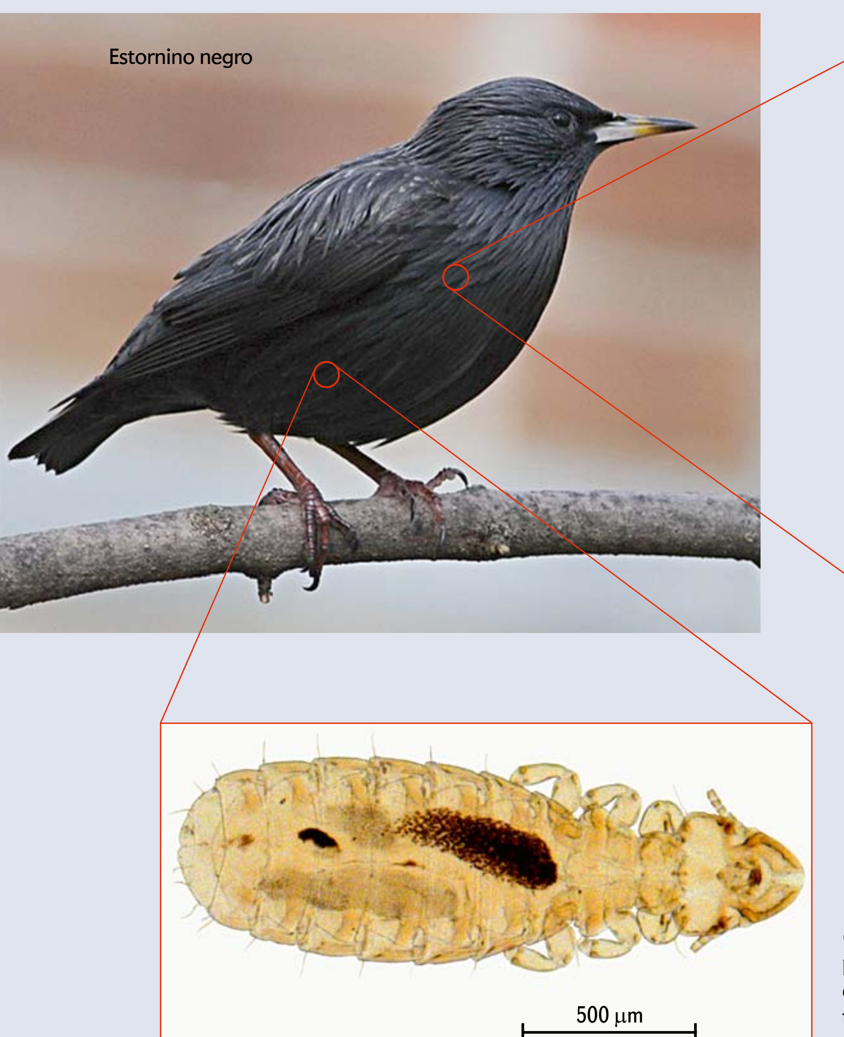
El estudio microscópico de estas estructuras constituye una valiosa herramienta para identificar patologías

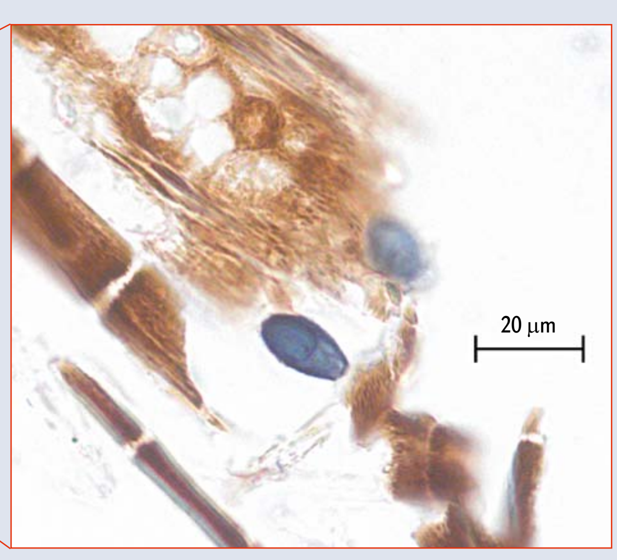
El plumaje es la primera barrera protectora que poseen las aves frente al medio externo y, al igual que el pelo de los mamíferos, ejerce diversas funciones. Entre ellas cabe destacar el mantenimiento de la temperatura corporal (homeotermia) o la comunicación visual con otros individuos de la misma especie. En este último caso, el aspecto de las plumas reviste especial importancia en actividades como el cortejo, sobre todo en los machos, ya que aquellos que presentan mejor condición física suelen exhibir plumajes más llamativos para las hembras y, por tanto, su posibilidad de reproducirse y trasmitir sus genes a la siguiente generación es mayor.

Las plumas pueden servir para detectar diversos problemas de salud en las aves. Nuestro grupo estudia la morfología microscópica de estas estructuras mediante técnicas histológicas. En estas páginas se ilustran algunos ejemplos de alteraciones que afectan a dos especies, el estornino negro (*Sturnus unicolor*) y el guacamayo azul y amarillo (*Ara ararauna*), aunque estas pueden observarse en cualquier otro grupo de aves.

En las plumas de los estorninos negros pueden hallarse artrópodos parásitos externos, como los piojos masticadores (orden Phthiraptera). También hemos detectado hongos dermatofitos (como los pertenecientes a los géneros *Microsporum* y *Trichophytum*), que digieren la quitina y alteran las plumas. Otra patología muy frecuente es la aparición de una serie de líneas, llamadas bandas de estrés, causadas por la carencia de algunos nutrientes durante el desarrollo de la pluma. Este fenómeno resulta fácil de observar en el guacamayo azul y amarillo, donde una mirada cercana permite detectar que las bandas corresponden a huecos en los que no hay bárbulas.

—María Valladolid y Manuela Gallardo
Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), Madrid





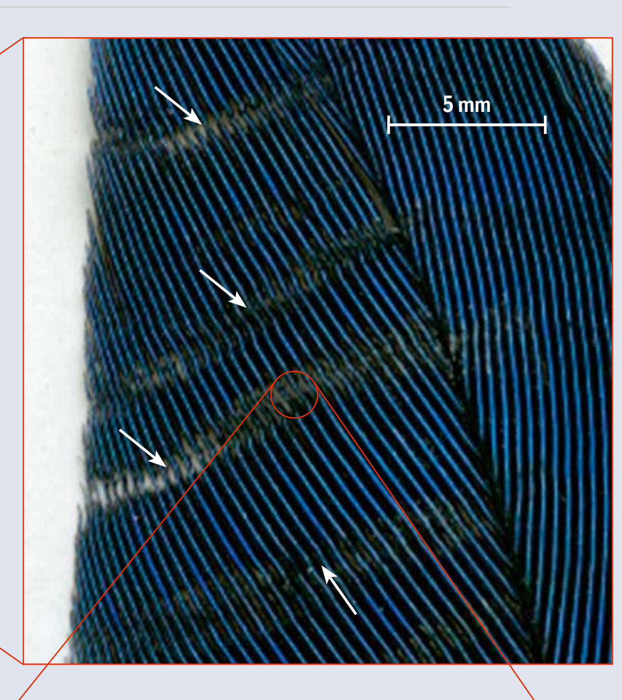
EN ESTE CORTE TRANSVERSAL de pluma de estornino negro se aprecian los macroconidios (un tipo de esporas) de un hongo dermatofito (*azul*).

EL PIOJO de la especie *Brueelia nebulosa* (en la imagen, una hembra) es unos de los parásitos que suelen vivir entre las plumas de los estorninos negros (*Sturnus unicolor*) y también de los pintos (*S. vulgaris*). La mancha oscura corresponde al aparato digestivo.

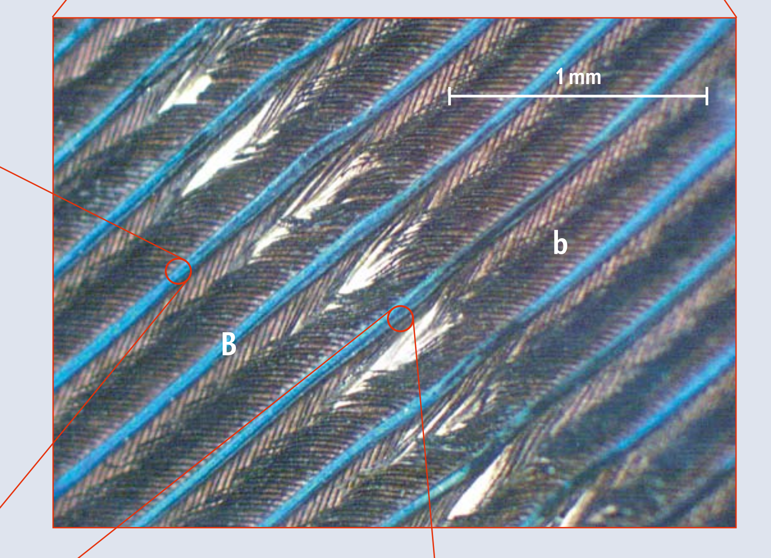
LUIS EGIDO (*estornino negro*); AINHOA SANZ Y LUISA BRONCANO (*corte transversal pluma*); MARÍA VALLADOLID, COLECCIÓN DE ENTOMOLOGÍA DEL MNCN-CSIC (*piojo*)



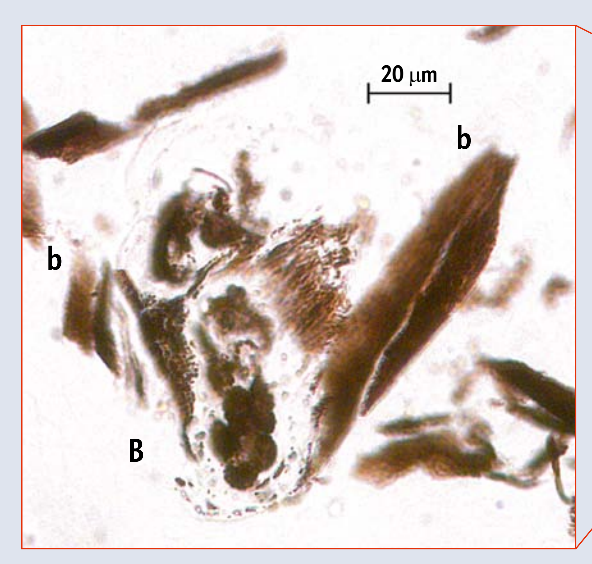
GUACAMAYO azul y amarillo.



EN ESTA PLUMA de guacamayo pueden observarse bandas de estrés provocadas por una carencia nutricional (*flechas*).



LAS BANDAS DE ESTRÉS, en una vista ampliada, se corresponden con zonas sin bárbulas.
B: barba, b: bárbula.





LA PÉRDIDA DE BÁRBULAS se pone de manifiesto al comparar bajo el microscopio dos cortes transversales de la pluma, uno de la zona normal, con barbas (B) y bárbulas (b) (*arriba*), y el otro de la zona afectada, donde solo se aprecia la barba (*derecha*).

© EFENZI/ISTOCKPHOTO (*guacamayo*); JESÚS MUÑOZ (*detalle de la pluma*); MANUELA GALLARDO (*ampliación de la pluma*); AINHOA SANZ Y LUISA BRONCANO (*cortes transversales de la pluma*)

por Sachiko Kusukawa



Sachiko Kusukawa es catedrática de historia y filosofía de la ciencia en el Trinity College de la Universidad de Cambridge.

La *Fabrica* de Vesalio

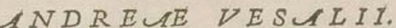
Ciencia y arte en un tratado de anatomía del Renacimiento

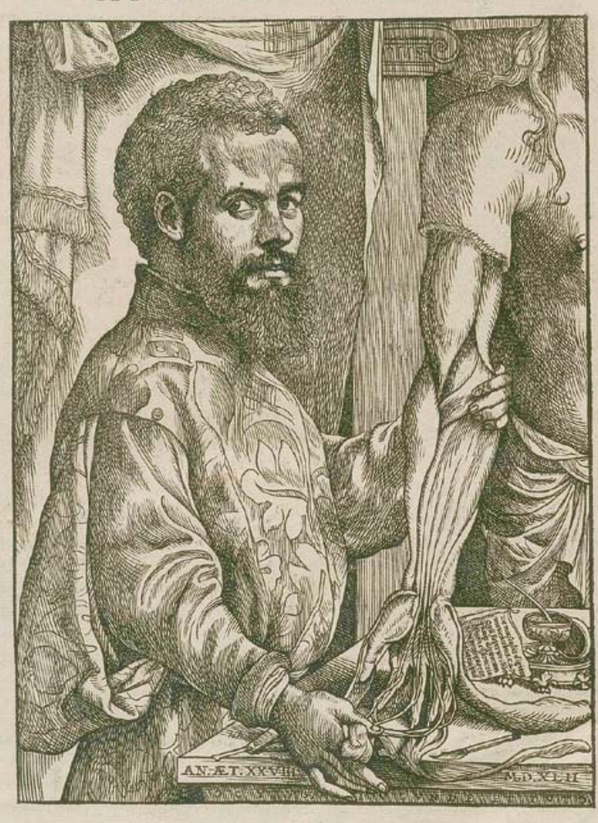
La historia de la anatomía en la Europa medieval desafía nuestro conocimiento intuitivo. Se suele afirmar que la Iglesia de la época prohibía la disección humana, pero no existen pruebas de que la desincentivase de manera deliberada. De hecho, a finales de la Edad Media, entre los siglos xiii y xv, la práctica de la disección era habitual con fines tan diversos como el embalsamamiento, la escisión fetal, la búsqueda de signos corporales de santidad o la investigación de muertes sospechosas. También en los hospitales se diseccionaba a las personas que fallecían en ellos; en el Ca' Granda de Milán, por ejemplo, se diseccionaba a los muertos y se les representaba visualmente ya en tiempos de Leonardo da Vinci (1452-1519), aunque no sabemos si Leonardo, que habitaba en la ciudad, asistió a alguna de aquellas disecciones. Hacia 1500, y aún sin ser común, la disección se practicaba con fines docentes en Francia e Italia.

También solemos creer que la disección anatómica constituye una práctica moderna, cuando lo cierto es que hunde sus raíces en la Antigüedad. Galeno, médico griego que ejerció en Roma en el siglo ii, ya defendió la importancia de la disección para entender el cuerpo humano. Su manual al respecto, *Procedimientos anatómicos*, fue redescubierto a principios del siglo xvi, lo que renovó el interés por la anatomía entre los médicos universitarios europeos de la época, espoleados en parte por la inclinación renacentista a emular las obras de la Grecia y la Roma clásicas.

Quien es considerado por muchos el fundador de la anatomía moderna es Andreas Vesalio (1514-1564). Nacido en Bruselas, este médico renacentista no hizo sino poner en práctica la recomendación de Galeno de usar las propias manos para conocer el cuerpo. Uno de los mayores retos a los que se enfrentó fue el de encontrar cadáveres para diseccionar. Los jueces permitían dicha práctica con criminales ejecutados siempre que fueran extranjeros y el profesor de medicina pagara el entierro. Sin embargo, los cuerpos así no abundaban, por lo que Vesalio se vio obligado a robar partes de cadáveres en cadalsos o en cementerios.

En ello radica una de las principales diferencias entre Vesalio y Galeno. Este último no pudo diseccionar cadáveres sistemáticamente, si bien su condición de médico de gladiadores debió de proporcionarle conocimientos sobre el cuerpo humano. Al seguir a Galeno e intentar obtener conocimiento anatómico a través de la disección, Vesalio advirtió que el médico griego había descrito el cuerpo humano a partir de la anatomía de otros animales, por lo que se dispuso a corregirlo. Con todo, la suya era una crítica «galénica», ya que privilegiaba el saber adquirido con ayuda de las manos y de los ojos frente a la autoridad de las obras (*véase la figura 1*).



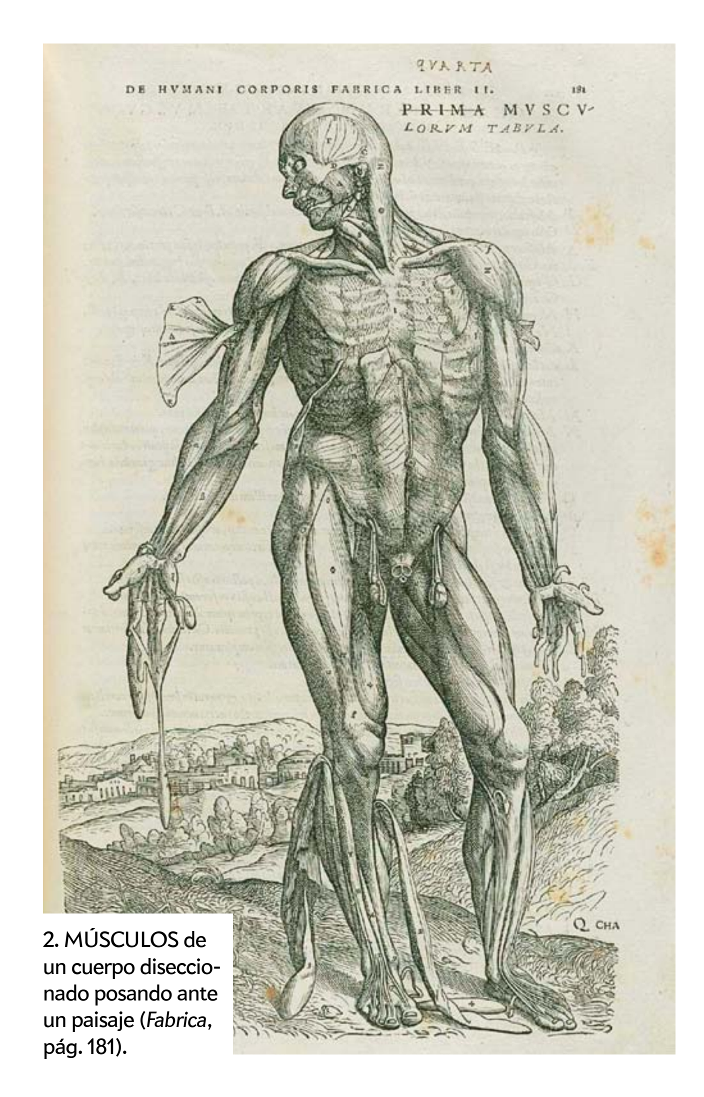


1. ANDREAS VESALIO diseccionando una mano. La estructura mostrada es el flexor digital superficial, en el cual se inserta el flexor digital profundo. La imagen probablemente sea obra del discípulo de Tiziano Jan Stephan van Calcar (*Fabrica*, pág. xii).

Vesalio no fue el primero en practicar la disección por sí mismo. Jacopo Berengario da Carpi (1460-1530) creía también que no se debía confiar en aquellos tratados anatómicos que contradecían la observación sensorial, y Niccolò Massa (1485-1569) afirmó que la anatomía «percibida por los sentidos» tenía preferencia sobre la expuesta por las autoridades en la materia, pues el ser humano es falible. Ambos dieron a conocer sus ideas en libros impresos y Berengario incluso se valió de grabados en madera para ilustrar el cuerpo humano. Sin embargo, lo que distinguiría a Vesalio de sus predecesores sería el tipo de libro que escribió y la importancia que otorgó a las ilustraciones.

La gran reputación de Vesalio responde en buena parte a su tratado de 1543 *Sobre la estructura del cuerpo humano.*

CORTESÍA DE LA BIBLIOTECA NACIONAL DE MEDICINA DE EE.UU. (*figuras 1 a 3*)



2. MÚSCULOS de un cuerpo diseccionado posando ante un paisaje (*Fabrica*, pág. 181).



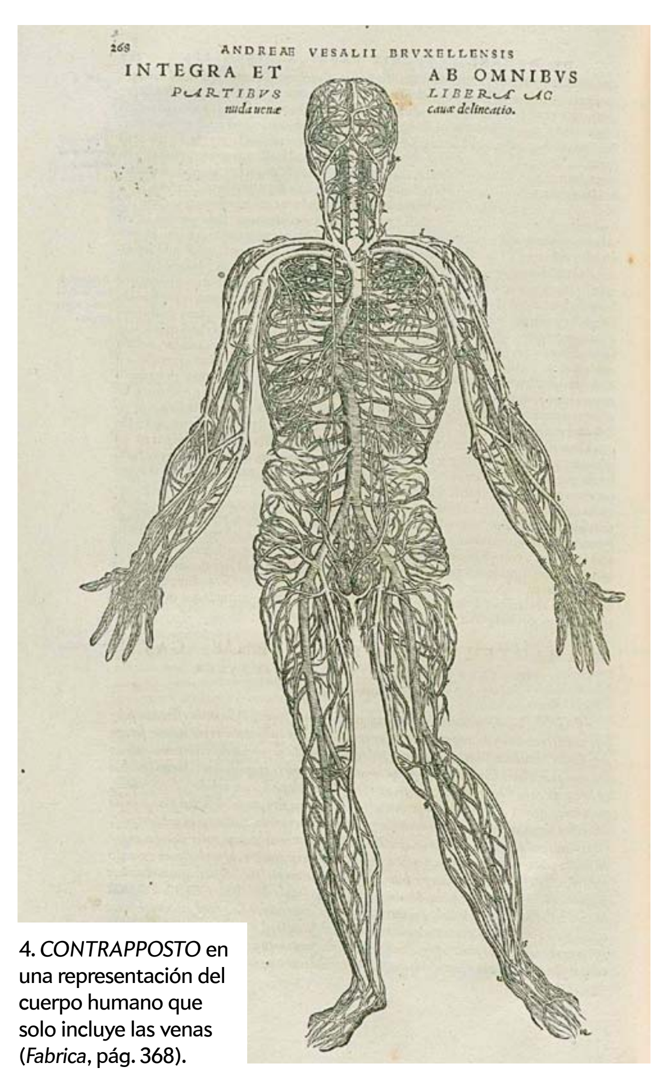
3. ESQUELETO humano ante un sarcófago en el que puede leerse «Se vive por el espíritu, el resto pertenecerá a la muerte» (*Fabrica*, pág. 164).

Conocido como la *Fabrica* por su título en latín (*De humani corporis fabrica*), fue la mayor obra de anatomía humana y la más ricamente ilustrada publicada jamás. Sus espectaculares imágenes a cuerpo entero revelaban progresivamente y con todo detalle la anatomía del cuerpo humano (*véase la figura 2*). Además, el efecto tridimensional conseguido mediante el sombreado era excepcional para tratarse de grabados en madera. Las ilustraciones de los libros impresos se hacían a partir de un dibujo original que un maestro grabador transfería después a un bloque de madera. No conocemos a los artesanos que crearon las imágenes de Vesalio. Uno de ellos pudo ser Jan Stephan van Calcar, discípulo de Tiziano, pero no hay pruebas de que Tiziano participara en la obra.

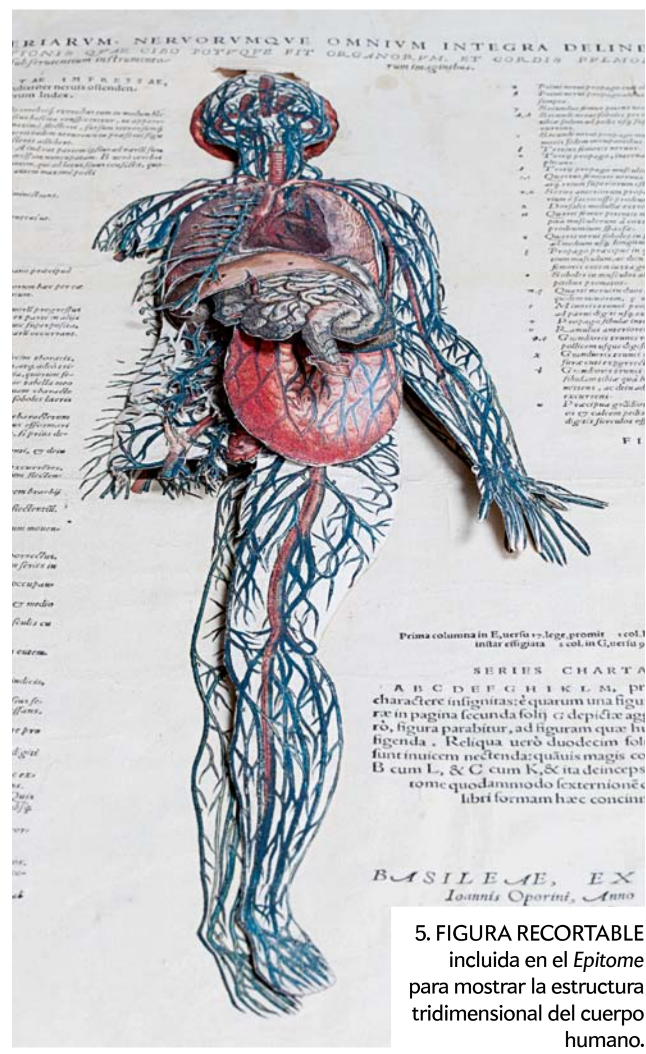
Uno de los aspectos más sorprendentes del libro de Vesalio reside en el carácter marcadamente artístico de sus figuras. Muchas posan ante un paisaje diseñado como un panorama continuo. Una de ellas representa las venas de un cuerpo modelado como el célebre *Torso de Belvedere*, mientras que otra muestra un esqueleto reclinado sobre un sarcófago lamentando la transitoriedad de la vida (*véase la figura 3*). Varias adoptan la postura conocida como *contrapposto* (los brazos abiertos, el torso levemente girado y un pie adelantado) para mostrar que las distintas capas representadas pertenecen al mismo cuerpo. Un ejemplo destacado lo hallamos en una figura que muestra las venas —y solo las venas— de un cuerpo en esta postura inconfundible, que permite prescindir del contorno (*véase la figura 4*).

Las poses y los gestos también ilustran las posiciones de los músculos cuando las piernas y los brazos se hallan en tensión o flexionados. Las figuras de perfil permiten a Vesalio representar de una vez la musculatura externa e interna de piernas y brazos. Para mostrar el cuerpo en tres dimensiones, Vesalio cambia de ángulo, como hace al representar el esqueleto visto de frente, de lado o de espaldas. La yuxtaposición de las mandíbulas superiores de un humano y un canino es otro de los hábiles recursos visuales que demuestran que la descripción de Galeno encajaba mejor con la estructura canina que con la humana.

Los grabados indican la capacidad de Vesalio para comunicar gran cantidad de información sobre la estructura del cuerpo humano y corregir las descripciones de Galeno, pero no dejaban de ser representaciones en un plano. Consciente de ello, Vesalio decidió mostrar las distintas capas en tres dimensiones. En su *Epítome de la estructura del cuerpo humano*, una edición abreviada de la *Fabrica* pero de mayor tamaño y que fue publicada el mismo año, incluyó un recortable del cuerpo diseccionado. La Biblioteca de la Universidad de Cambridge posee uno de los raros ejemplares que se conservan, una edición coloreada que constituye uno los primeros ejemplos de figuras



4. *CONTRAPPOSTO* en una representación del cuerpo humano que solo incluye las venas (*Fabrica*, pág. 368).



5. FIGURA RECORTABLE incluida en el *Epitome* para mostrar la estructura tridimensional del cuerpo humano.

recortables en un libro impreso (*véase la figura 5*).

Hasta la publicación de la *Fabrica*, los libros de anatomía humana eran breves, pequeños y apenas contenían ilustraciones, ya que ello los hacía asequibles para los estudiantes de medicina, el público al que iban dirigidos. La *Fabrica* no estaba a su alcance, pues costaba el equivalente a treinta comidas en un establecimiento municipal de la época. ¿Por qué produjo Vesalio un libro tan extraordinario e impresionante?

Vesalio provenía de una familia de médicos: su padre, su abuelo y su bisabuelo habían servido al Sacro Imperio Romano Germánico. La *Fabrica* era su carta de presentación ante el emperador Carlos I, a quien ofreció una copia coloreada (un ejemplar que, en 1998, sería subastado en Christie's por 1,6 millones de dólares). Pocos meses después de presentar el libro, Vesalio fue nombrado médico imperial. ¡La *Fabrica* fue una elaborada solicitud de trabajo que tuvo éxito! Pero el emperador no fue el único que quedó impresionado con el libro, el cual devino en modelo. El grabado del esqueleto, por ejemplo, fue copiado no solo por anatomistas, sino también por numerosos artistas.

Puede parecer sorprendente que las ilustraciones de un tratado anatómico encontrasen una recepción tan amplia, pero conviene recordar que, en aquella época, ciencia y arte no eran campos separados, mutuamente excluyentes, de la actividad humana. IyC

PARA SABER MÁS

The anatomical Renaissance: The resurrection of the anatomical projects of the ancients. Andrew Cunningham. Scolar Press, 1997.

Secrets of women: Gender, generation, and the origins of human dissection. Katharine Park. Zone Books, 2006.

Leonardo da Vinci's anatomical studies in Milan: A re-examination of sites and sources. Monica Azzolini en *Visualizing medieval medicine and natural history, 1200-1550*; dirigido por Jean A. Givens, Karen M. Reeds y Alain Touwaide, págs. 147-176. Ashgate Publishing, 2006.

Picturing the book of nature: Image, text, and argument in sixteenth-century human anatomy and medical botany. Sachiko Kusukawa. The University of Chicago Press, 2012.

Las ilustraciones de la *Fabrica* y del *Epitome* pueden consultarse en línea en la página web de la Biblioteca de la Universidad de Cambridge: **https://exhibitions.lib.cam.ac.uk/Vesalius**

EN NUESTRO ARCHIVO

La anatomía latina medieval. Pedro Gil Sotres en «Ciencia medieval», colección *Temas* de *IyC* n.º 41, 2005.

CORTESÍA DE LA BIBLIOTECA NACIONAL DE MEDICINA DE EE.UU. (*figura 4*); REPRODUCIDO CON PERMISO DEL SÍNDICO DE LA BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE, CCF.46.36 (*figura 5*)

por Carlos A. González Svatetz

Carlos A. González Svatetz es epidemiólogo investigador de la Unidad de Nutrición y Cáncer del Instituto Catalán de Oncología de Barcelona. Ha sido el creador y coordinador del Estudio Prospectivo Europeo sobre Nutrición y Cáncer en España.



¿Influye la alimentación en el cáncer?

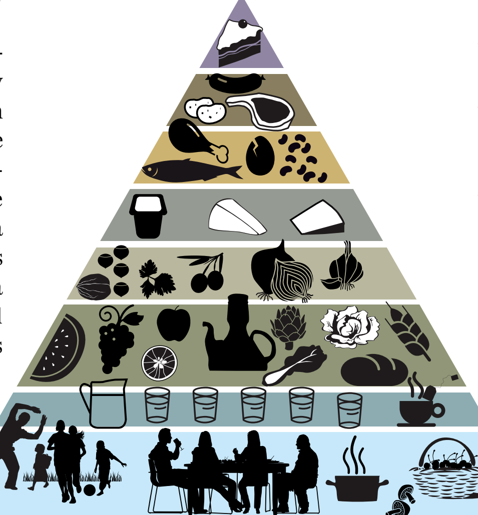
La enfermedad podría evitarse en gran medida con una dieta y un estilo de vida saludables

El cáncer representa la primera causa de mortalidad en los varones y la segunda en las mujeres. Es, en consecuencia, uno de los mayores problemas de salud pública del mundo. En 2012, se estimó que se habían producido 14 millones de casos nuevos y que habían fallecido 8 millones de personas por esta enfermedad. Para 2030, se prevé que las muertes ascenderán a 13,2 millones. En España se diagnostican más de 200.000 casos nuevos de cáncer cada año, y se calcula que uno de cada tres habitantes desarrollará algún tumor a lo largo de su vida.

Aunque solemos hablar del cáncer como si se tratara de una entidad única, en realidad engloba distintas enfermedades provocadas por múltiples factores. Muchas de las causas son bien conocidas, pero en numerosos tumores relativamente frecuentes todavía no están lo bastante bien definidas. En el cáncer se ven afectados los mecanismos genéticos de regulación y control del crecimiento y reproducción celular. Estas alteraciones son desencadenadas, principalmente, por la exposición a ciertas condiciones ambientales y de estilo de vida. Los factores genéticos hereditarios que causan por sí mismos un tumor representan una clara minoría.

Por lo que respecta a los factores ambientales y al estilo de vida, existen hoy pruebas científicas sólidas que demuestran la asociación entre una amplia variedad de tumores y el tabaquismo, una alimentación inadecuada, la obesidad, la falta de actividad física, el consumo de alcohol, la exposición solar, los agentes biológicos como virus y bacterias, y la exposición a sustancias cancerígenas presentes en el ambiente o en el lugar de trabajo. Todos estos riesgos son en gran parte evitables o modificables, por lo que el cáncer podría prevenirse en gran medida mediante un estilo de vida y un ambiente apropiados. Sin embargo, parece que los esfuerzos de la comunidad científica y de las autoridades sanitarias se orientan prioritariamente a encontrar tratamientos farmacológicos curativos, más que a la prevención.

La hipótesis de que la alimentación puede relacionarse con la aparición de un cáncer es tan antigua como la humanidad misma. Pero en los últimos cincuenta años la ha venido confirmando un número creciente de datos, sobre todo procedentes de estudios de laboratorio con animales y de estudios observacionales y de intervención en poblaciones humanas. Hay pruebas científicas consistentes que demuestran que un alto consumo de diversas frutas y verduras y de cereales integrales, ricos en fibras y compuestos antioxidantes, reducen el riesgo de numerosos tumores. Por otro lado, se ha comprobado que una dieta con una elevada proporción de carnes conservadas, de carnes rojas (ternera, cerdo, oveja, caballo) y de alcohol aumentan el riesgo de diversos tumores. En los últimos años se han obtenido asimismo pruebas claras de que el sobrepeso y la obesidad, asociados a una alta ingesta de calorías (por el excesivo consumo de grasas de origen animal y de bebidas azucaradas) y a una baja actividad física, son una de las causas de varios tipos de cáncer. Los datos señalan, además, la posible influencia de la alimentación en el riesgo de recidiva y supervivencia de personas que ya han padecido un cáncer, especialmente de mama o de colon y recto.

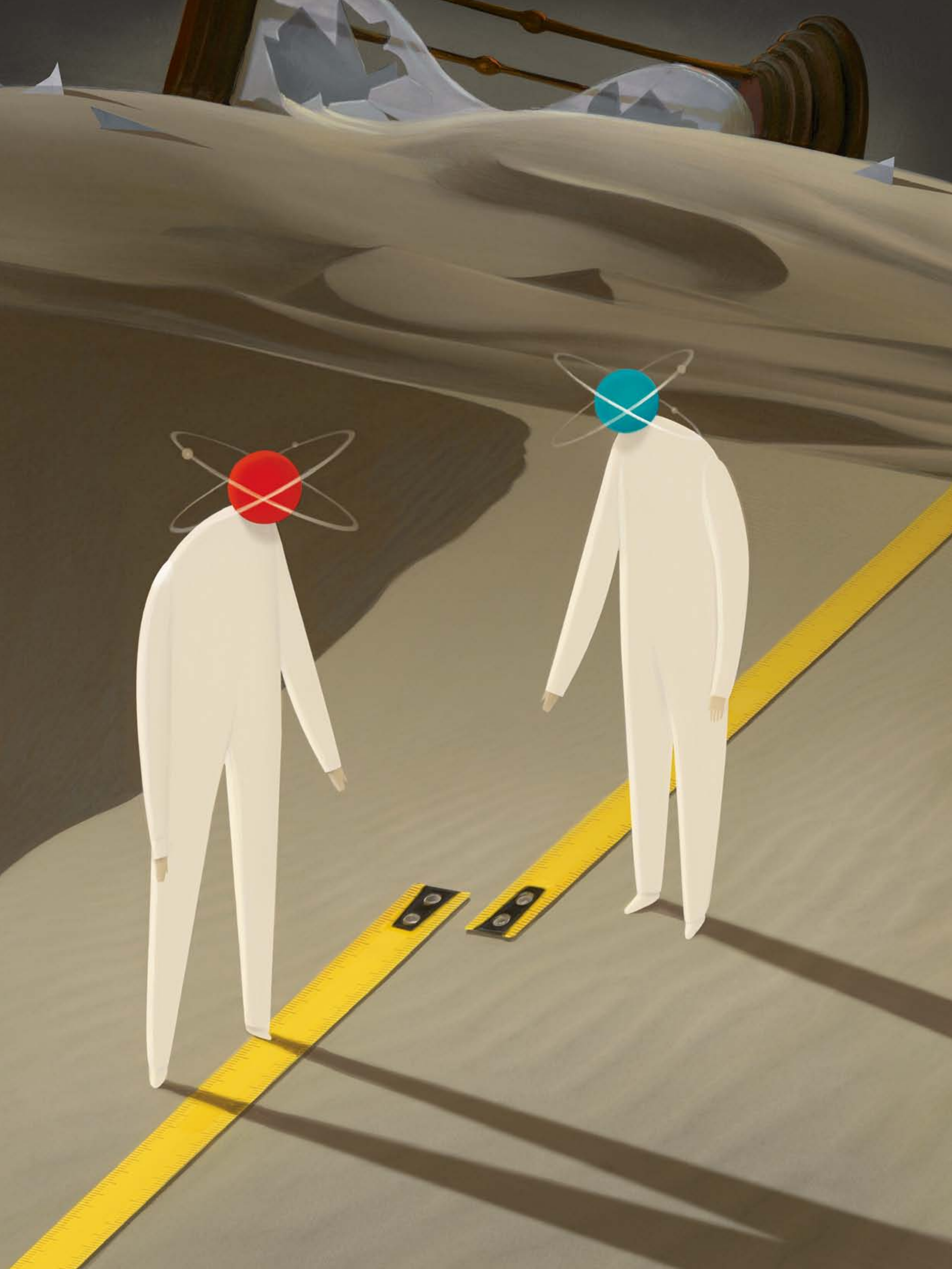


PIRÁMIDE de la dieta mediterránea

Cuando valoramos el efecto de los alimentos y los nutrientes es imprescindible mantener un enfoque riguroso, basado en pruebas contrastadas y sólidas. Existe hoy un gran interés social y mediático sobre la alimentación, y asistimos a la publicación continuada de resultados no definitivos y a veces contradictorios. Algunos textos de divulgación dudosos proclaman supuestos beneficios de ciertos alimentos sobre el cáncer y crean falsas ilusiones sobre productos milagrosos, o, por el contrario, provocan recelos acerca de ciertos comestibles presuntamente dañinos para la salud. Debemos ser conscientes de que no hay alimentos milagrosos contra el cáncer y que tampoco existe una sociedad sin riesgo. Convivimos con factores que aumentan o reducen el riesgo de padecerlo y, con nuestras propias decisiones diarias sobre lo que comemos, bebemos o hacemos, aumentamos o disminuimos las posibilidades de enfermar y morir a causa de este mal.

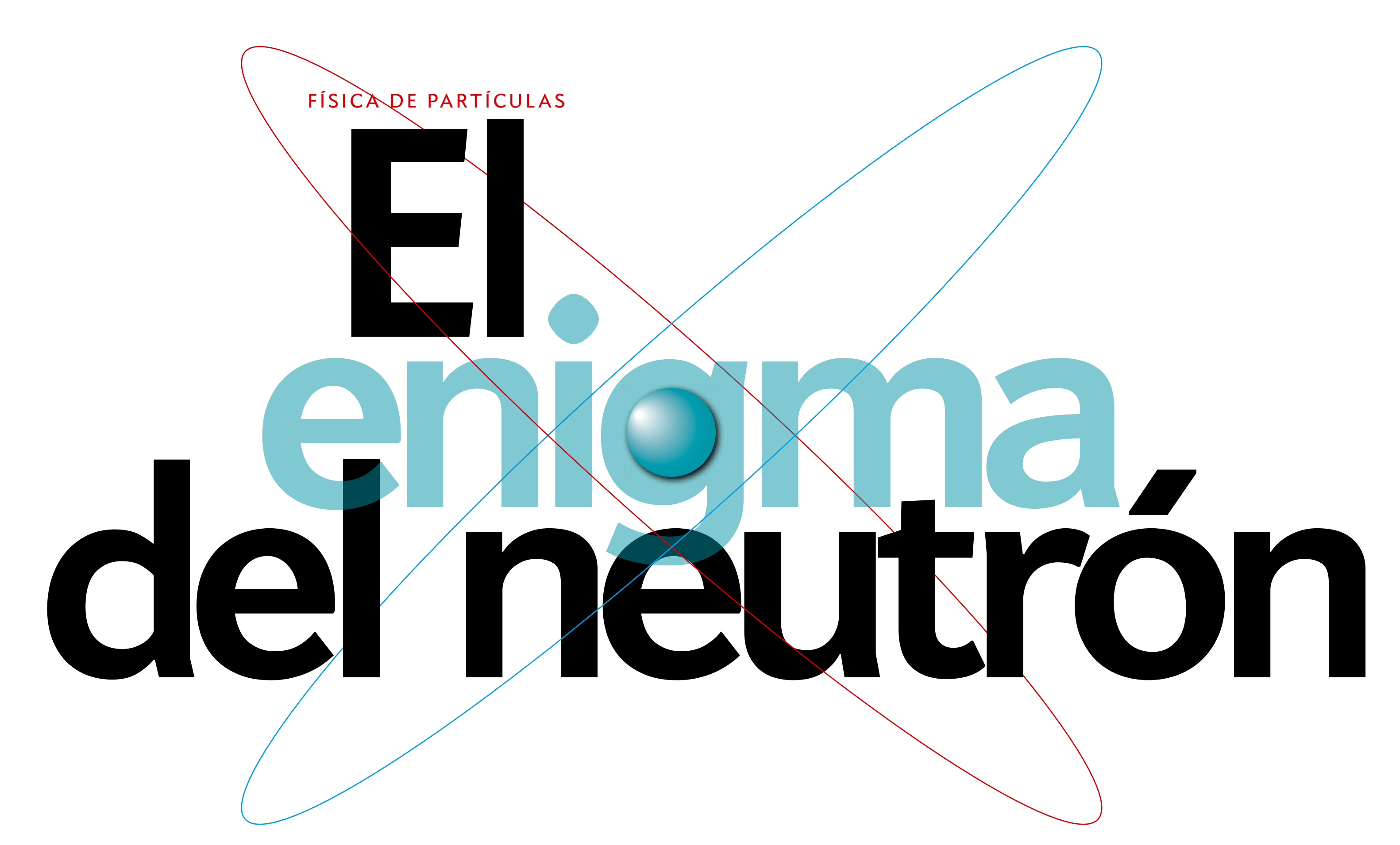
Importantes investigaciones recientes han mostrado que mantener un estilo de vida saludable, consistente en seguir una dieta del tipo de la mediterránea, consumir alcohol de forma moderada, no fumar, realizar actividad física diaria (caminar unos treinta minutos al día) y evitar la obesidad, reduce un 30 por ciento el riesgo de cáncer de colon y recto, un 25 por ciento el de mama y más del 40 por ciento el de estómago. Es importante que todos dispongamos de la información que la ciencia nos proporciona. Sin duda que mantener una vida saludable vale la pena.

© 2010 FUNDACIÓN DIETA MEDITERRÁNEA



FÍSICA DE PARTÍCULAS

El enigma del neutrón



Dos técnicas de precisión arrojan valores distintos para el tiempo que tardan los neutrones en desintegrarse. ¿Se trata de un error experimental, o hay un misterio más profundo?

Geoffrey L. Greene y Peter Geltenbort

BILL MAYER

EN SÍNTESIS

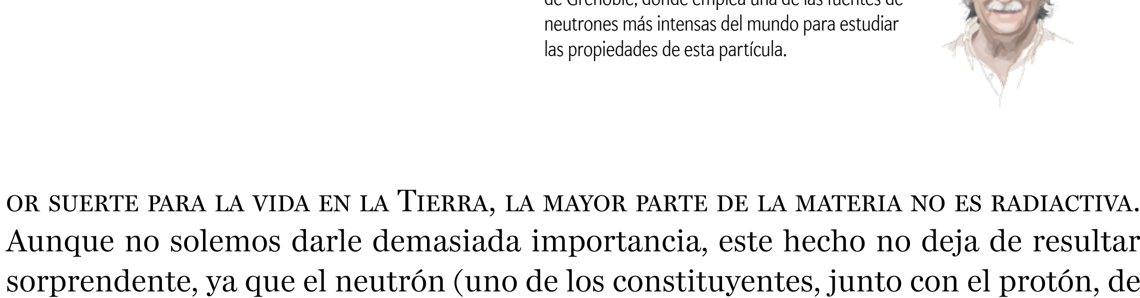
Los neutrones libres no son estables: pasados unos 15 minutos, un neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino. Conocer con exactitud su vida media es clave para abordar varias cuestiones en física y cosmología.

Existen dos métodos para determinar con precisión la vida media de esta partícula. El primero cuenta los neutrones que quedan en un recipiente después de cierto tiempo; el segundo cuenta los protones generados en su desintegración.

Hace años que una y otra técnica arrojan valores considerablemente dispares. Se cree que la discrepancia obedece a errores sistemáticos en alguno de los experimentos; sin embargo, hasta ahora nadie ha logrado dar con ellos.

Geoffrey L. Greene es catedrático de física en la Universidad de Tennessee y miembro de la Fuente de Espalación de Neutrones del Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Ha estudiado las propiedades del neutrón durante más de cuarenta años.

Peter Geltenbort trabaja en el Instituto Laue-Langevin de Grenoble, donde emplea una de las fuentes de neutrones más intensas del mundo para estudiar las propiedades de esta partícula.



Por suerte para la vida en la Tierra, la mayor parte de la materia no es radiactiva. Aunque no solemos darle demasiada importancia, este hecho no deja de resultar sorprendente, ya que el neutrón (uno de los constituyentes, junto con el protón, de los núcleos atómicos) es propenso a desintegrarse. En el interior de un núcleo típico el neutrón puede vivir durante largo tiempo, pero, aislado, se desintegra en otras partículas en unos 15 minutos. Decimos «unos 15 minutos» para ocultar nuestra ignorancia al respecto, ya que, hasta ahora, no hemos sido capaces de medir con exactitud la vida media de esta partícula.

Resolver este «rompecabezas de la vida media del neutrón» no solo supone una cuestión de orgullo para nuestro gremio, el de los físicos experimentales, sino que resulta también vital para comprender mejor las leyes físicas. La desintegración del neutrón constituye uno de los procesos más sencillos en los que interviene la interacción débil, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Para entenderla por completo, hemos de saber cuánto tarda un neutrón aislado en desintegrarse. Por otro lado, la vida media del neutrón condicionó cómo se formaron los elementos químicos más ligeros después de la gran explosión que dio origen a nuestro universo. A los cosmólogos les gustaría poder calcular las abundancias esperadas de los distintos elementos y contrastarlas con los datos obtenidos por los astrofísicos. Un acuerdo apuntalaría nuestras teorías cosmológicas, mientras que una discrepancia indicaría la existencia de fenómenos físicos aún por descubrir. Pero, para poder llevar a cabo dicha comparación, hemos de conocer con exactitud cuánto vive un neutrón antes de desintegrarse.

Hace más de diez años, dos grupos experimentales, uno en Francia y otro en EE.UU., intentaron medir con precisión la vida media del neutrón. Uno de nosotros (Geltenbort) pertenecía al primer equipo, mientras que el otro (Greene) trabajaba en el segundo. Con sorpresa y cierta inquietud, comprobamos que nuestros resultados diferían de manera considerable. Algunos teóricos sugirieron que la discrepancia podría deberse a fenómenos físicos exóticos, como que parte de los neutrones se hubiesen desintegrado en partículas nunca antes observadas. Nosotros, sin embargo, achacamos la diferencia a una razón mucho más mundana: uno de los grupos —o ambos— tenía que haber cometido algún error o sobreestimado la precisión de sus resultados.

Hace poco, el equipo estadounidense completó un largo y concienzudo proyecto para estudiar la principal fuente de error que afectaba a sus mediciones. Lejos de zanjar la cuestión, sus esfuerzos solo confirmaron los resultados previos. Al mismo tiempo, otros investigadores verificaron los resultados del grupo de Geltenbort. Esta discrepancia nos ha dejado más perplejos de lo que ya estábamos, pero no hemos abandonado. Por el momento, ambos equipos y otros físicos experimentales seguimos buscando una respuesta.

CRONOMETRAR NEUTRONES

En teoría, determinar la vida media del neutrón es sencillo. Entendemos bien la física del proceso y disponemos de las herramientas adecuadas para estudiarlo. Sabemos que, siempre que una partícula pueda desintegrarse en otras de menor masa, acabará haciéndolo si en el proceso se conservan ciertas propiedades, como la carga eléctrica o el espín. En la llamada desintegración beta, un neutrón se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino. Las masas de estas tres partículas suman algo menos que la masa del neutrón, pero la carga y el espín totales permanecen idénticos. Entre las cantidades conservadas se incluye la suma de masa y energía, por lo que las tres partículas finales incorporan esa pequeña diferencia de masa en forma de energía cinética.

Dado un neutrón concreto, es imposible predecir cuándo se desintegrará. Ello se debe a que se trata de un proceso cuántico inherentemente aleatorio, por lo que lo único que podemos calcular es cuánto tiempo vive un neutrón en término medio. A tal fin, hemos de estudiar la desintegración de un gran número de ellos. Este objetivo se ha perseguido por medio de dos técnicas experimentales, conocidas como método del confinamiento y método del haz. En el primero, los neutrones se introducen en un contenedor y, transcurrido cierto tiempo, se cuenta cuántos quedan. En el segundo se detectan los protones producidos en su desintegración.

El método del confinamiento fue el empleado por el grupo de Geltenbort. Esta técnica resulta muy delicada, ya que los neutrones escapan con facilidad de la mayoría de los recipientes. Para evitarlo, se sigue una idea propuesta el siglo pasado por el físico soviético Yákov Zeldóvich, consistente en atrapar neutrones muy fríos (es decir, con muy poca energía cinética) en un contenedor de paredes muy lisas. Si los neutrones son lo bastante lentos y las paredes lo suficientemente lisas, rebotarán contra ellas y permanecerán en el recipiente. A tal fin, los neutrones han de moverse a

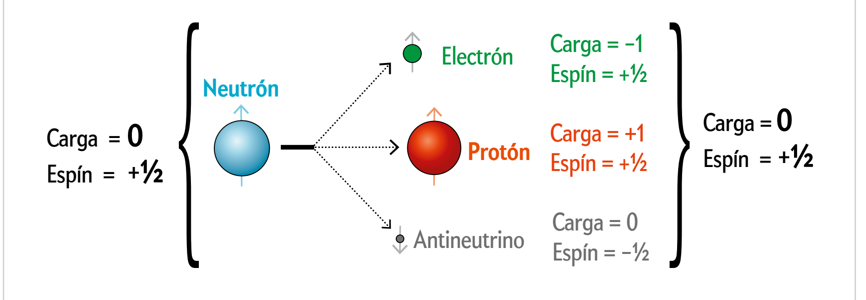
velocidades muy bajas, del orden de pocos metros por segundo (en comparación, un neutrón típico emitido en un proceso de fisión nuclear viaja a unos 10 millones de metros por segundo). En otras palabras: los neutrones son tan lentos que podríamos adelantarlos corriendo. Hasta la fecha, el experimento más preciso de este tipo se ha llevado a cabo en el Instituto Laue-Langevin (ILL) de Grenoble.

Sin embargo, ningún contenedor es perfecto. Algunos neutrones acabarán escapando del recipiente y, si atribuimos su pérdida a la desintegración beta, deduciremos un valor erróneo para la vida media del neutrón. Por tanto, los datos experimentales deben corregirse a fin de contar únicamente los neutrones que han desaparecido como consecuencia de una desintegración.

DESINTEGRACIÓN BETA

Vida y muerte del neutrón

A pesar de que la vida media del neutrón no ha logrado determinarse con exactitud, el proceso mediante el cual estas partículas se desintegran es bien conocido. Transcurridos unos 15 minutos, un neutrón libre se convierte espontáneamente en un protón, un electrón y un antineutrino. El proceso, conocido como desintegración beta, garantiza la conservación del espín y de la carga eléctrica.



NIGEL HAWTIN

Esa corrección puede efectuarse gracias a una técnica muy astuta. El número de neutrones que escapan del recipiente depende de cuántos chocan contra las paredes por unidad de tiempo. Si los neutrones se mueven más despacio, o si el contenedor es más voluminoso, el número de colisiones contra las paredes disminuirá y, con ello, también lo hará la pérdida de neutrones. Al variar el tamaño del contenedor y la energía de los neutrones, podemos estudiar distintos casos y, al final, extrapolar a una situación ideal en la que no hay choques contra las paredes (ni, por tanto, pérdidas). Por supuesto, esta extrapolación no es perfecta, pero puede controlarse para que el error que induce sea tenido en cuenta en el resultado final.

Por su parte, el método del haz fue el empleado por Greene y su equipo en el Centro para la Investigación de Neutrones del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) estadounidense. En él, se envía un haz de neutrones fríos a través de un campo magnético y de un anillo de electrodos sometidos a un voltaje elevado. Los neutrones carecen de carga eléctrica, por lo que atraviesan el montaje sin problemas. Pero, si uno de ellos se desintegra, el protón generado quedará apresado en el anillo. En principio, la técnica para atrapar protones y detectarlos funciona casi a la perfección, por lo que, para evaluar las pocas desintegraciones que puedan haber pasado inadvertidas, solo necesitamos implementar pequeñas correcciones.

¿DÓNDE ESTÁ EL FALLO?

Para que sea útil, todo resultado experimental debe venir acompañado de una estimación fiable de su error. Medir la altura de una persona con un error de un metro aporta mucha menos información que medirla con un error de un milímetro. Por ello, siempre que efectuamos medidas de precisión, incluimos una estimación muy cuidadosa del error. Un error de un segundo, por ejemplo, significa que el valor experimental tiene una probabilidad muy baja de alejarse más de un segundo (por arriba o por abajo) del valor verdadero.

Toda medida experimental se ve afectada por dos fuentes de error. Por un lado están los errores estadísticos, los cuales se deben a que siempre examinamos una muestra de tamaño finito (en nuestro caso, la desintegración de un número finito de neutrones). Cuanto mayor sea la muestra, menor será el error estadístico.

La segunda fuente de error corresponde a los errores sistemáticos. Estos resultan mucho más difíciles de estimar, ya que tienen su origen en las imperfecciones del proceso de medida. Algunos de ellos pueden ser simples, como un instrumento mal calibrado, pero otros son mucho más sutiles, como los sesgos en la muestra. Por ejemplo, si en una encuesta telefónica solo llamamos a teléfonos fijos, puede ocurrir que nuestra muestra no sea representativa de la población. Aunque los físicos experimentales dedicamos buena parte de nuestros esfuerzos a reducir los errores sistemáticos, estos nunca pueden eliminarse por completo. Lo máximo que cabe hacer es analizar con detalle todas las fuentes de error imaginables y evaluar su efecto en el resultado final. Después, este se combina con el error estadístico para obtener un error total fiable. En otras palabras: ponemos un gran empeño en ponderar las «incógnitas conocidas».

No obstante, nuestro mayor miedo es que estemos pasando por alto alguna «incógnita desconocida»: algún error sistemático que ni siquiera sospechamos que existe. Por más que analicemos con cautela todas las fuentes de error, la única manera de estar seguros pasa por realizar un experimento independiente, basado en otro procedimiento y propenso a sufrir otros errores sistemáticos. Si dos experimentos distintos producen resultados compatibles, nuestra confianza en ellos aumenta. En caso contrario, tenemos un problema.

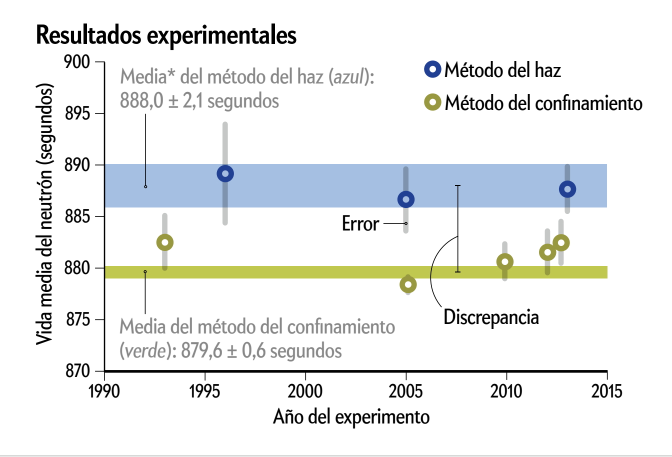
En lo referente a la vida media del neutrón, disponemos de dos experimentos independientes: el del confinamiento y el del haz. Los resultados más recientes obtenidos en el NIST con la técnica del haz arrojan un valor para la vida media del neutrón de 887,7 segundos. El error estadístico asciende a 1,2 segundos, mientras que el sistemático es de 1,9 segundos. Al combinarlos de la manera adecuada, obtenemos un error total de 2,2 segundos. Eso quiere decir que, con una probabilidad del 68 por ciento, el verdadero valor de la vida media del neutrón debería encontrarse en una horquilla de 2,2 segundos en torno al resultado experimental.

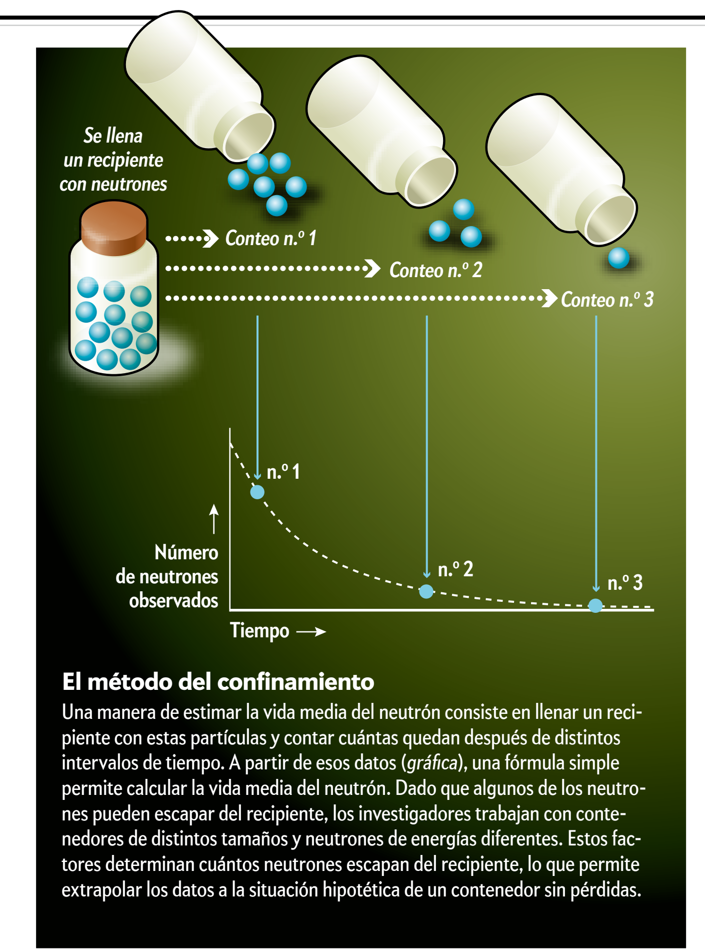
Por otro lado, el resultado del ILL, basado en la técnica del confinamiento, es de 878,5 segundos, con un error estadístico de 0,7 segundos y uno sistemático de 0,3. Al combinarlos, obtenemos un error total de 0,8 segundos.

EXPERIMENTOS

Dos técnicas, dos resultados

Hasta ahora se han empleado dos métodos para determinar con precisión la vida media del neutrón: la técnica del confinamiento y la del haz (*derecha*). Desde hace años, todos los experimentos de un mismo tipo vienen produciendo resultados compatibles entre sí dentro del error experimental. Sin embargo, una y otra técnica arrojan valores medios que difieren en unos 8 segundos. Aunque esta discrepancia pueda parecer pequeña, es muy inferior al error de ambos experimentos (*abajo*). Ello apunta a la existencia de un problema real: o bien se han subestimado errores sistemáticos, o bien en el proceso interviene algún fenómeno físico hasta ahora desconocido.





El método del confinamiento

Una manera de estimar la vida media del neutrón consiste en llenar un recipiente con estas partículas y contar cuántas quedan después de distintos intervalos de tiempo. A partir de esos datos (*gráfica*), una fórmula simple permite calcular la vida media del neutrón. Dado que algunos de los neutrones pueden escapar del recipiente, los investigadores trabajan con contenedores de distintos tamaños y neutrones de energías diferentes. Estos factores determinan cuántos neutrones escapan del recipiente, lo que permite extrapolar los datos a la situación hipotética de un contenedor sin pérdidas.


La media del método haz no incluye las medidas de 2005, ya que estas fueron reemplazadas por las de 2013.

NIGEL HAWTIN

Aunque estos son los resultados más precisos obtenidos hasta la fecha, vemos que difieren en unos 9 segundos. Puede que la discrepancia no parezca excesiva, pero es mucho mayor que el error estimado en cada experimento. De hecho, la probabilidad de obtener un desacuerdo semejante por pura casualidad es del orden de una parte entre 10.000. Por tanto, hemos de considerar seriamente la posibilidad de que estemos obviando algún efecto desconocido.

FÍSICA EXÓTICA

Una posibilidad muy emocionante es que la discrepancia radique en algún fenómeno físico aún por descubrir. Una razón para pensarlo se debe a que, aunque ambos métodos arrojan resultados distintos, los experimentos de un mismo tipo proporcionan resultados compatibles entre sí.

Supongamos que, además de experimentar la desintegración beta habitual, algunos neutrones también desapareciesen por medio de un proceso desconocido hasta ahora y en el que interviniesen partículas distintas del protón. El método del confinamiento mide el número total de neutrones desaparecidos, por lo que estaría contando tanto aquellos neutrones que han sufrido una desintegración beta como aquellos que han experimentado el segundo proceso. Por tanto, esta técnica nos llevaría a concluir que la vida media del neutrón es menor de lo que cabría esperar si solo considerásemos las desintegraciones beta. Por otro lado, el método del haz cuenta protones, por lo que solo mide el número de desintegraciones beta y, como tal, arrojaría un valor mayor para la vida media del neutrón. De hecho, eso es lo que observamos: el método del haz apunta a una vida media del neutrón más larga que el método del confinamiento.

Algunos teóricos han considerado con detalle esta posibilidad. Zurab Berezhiani, de la Universidad de L'Aquila, y sus colaboradores han sugerido la existencia de un proceso de desintegración secundario, según el cual un neutrón libre se transmutaría en un hipotético «neutrón espejo». Esta partícula, hasta ahora desconocida, no interaccionaría con la materia ordinaria, por lo que el neutrón original desparecería sin dejar rastro. Además, la existencia de este tipo de «materia espejo» contribuiría a explicar la materia oscura del universo. Aunque se trata de una idea interesante, sigue considerándose muy especulativa. Será necesaria una confirmación más sólida de la discrepancia entre ambos experimentos para que la mayoría de los físicos acepte un concepto tan radical como el de la materia espejo.

En nuestra opinión, lo más probable es que uno o incluso los dos experimentos estén pasando por alto algún efecto sistemático. A fin de cuentas, esta posibilidad siempre planea sobre cualquier experimento que trabaje con montajes tan sensibles.

LA IMPORTANCIA DE UN NÚMERO

Como físicos experimentales, aislar el origen de la discrepancia nos traería paz de espíritu. Sin embargo, el problema encierra también una cuestión de gran importancia: determinar sin am-



El método del haz

Esta técnica no cuenta los neutrones, sino los protones generados en su desintegración. Para ello, se dirige un haz de neutrones a través de una trampa electromagnética y de un anillo de electrodos sometidos a un voltaje elevado. Los neutrones carecen de carga eléctrica, por lo que atraviesan el montaje sin impedimentos. Sin embargo, si uno de ellos se desintegra, el protón producido quedará apresado. Al saber cuántos neutrones hay en el haz y cuánto tardan en atravesar la trampa, el número de protones detectados permite inferir cuántos neutrones se han desintegrado por unidad de tiempo (*gráfica*). A partir de dicha cantidad puede calcularse fácilmente la vida media del neutrón.

bigüedades la vida media del neutrón nos permitiría entender mejor varios aspectos de nuestro universo.

En primer lugar, nos ayudaría a comprender con detalle los efectos de la interacción débil en otras partículas. Esta fuerza es la responsable de las desintegraciones radiactivas y de los procesos de fusión nuclear que tienen lugar en el Sol. La desintegración beta del neutrón constituye uno de los procesos más sencillos en los que interviene la interacción débil. Para calcular los detalles de otros fenómenos más complejos, primero deberíamos entender bien cómo opera esta fuerza en la desintegración del neutrón.

Pero, además, conocer con exactitud la vida media del neutrón también nos permitiría entender mejor la evolución del universo primitivo. Según la teoría de la gran explosión, cuando el cosmos apenas contaba un segundo de vida, todo era en una mezcla muy densa de protones, neutrones, electrones y otras partículas. La temperatura alcanzaba los 10.000 millones de grados, por lo que las partículas eran demasiado energéticas para formar átomos o núcleos. Al cabo de unos tres minutos, el universo se expandió y se enfrió, lo que permitió que algunos protones y neutrones se uniesen en núcleos de deuterio, un isótopo pesado del hidrógeno. Eso permitió la creación de otros núcleos, ya que el deuterio puede capturar un protón y formar un isótopo ligero del helio, o unirse a otro núcleo de deuterio para dar lugar al helio común. Todo ello permitió la creación de varios elementos hasta el litio (los elementos más pesados se sintetizarían millones de años más tarde en el corazón de las primeras estrellas).

El proceso que acabamos de describir se conoce como nucleosíntesis primordial. Sin embargo, si los neutrones se hubiesen desintegrado a una velocidad mucho mayor mientras el universo se enfriaba, casi no habría quedado ninguno cuando el cosmos adquirió la temperatura adecuada para formar los primeros núcleos: prácticamente solo habrían sobrevivido protones, por lo que el universo se compondría casi exclusivamente de hidrógeno. Por otro lado, una vida media del neutrón demasiado larga habría resultado en una sobreabundancia de helio, lo que habría afectado a la formación de elementos más pesados y, con ello, a la evolución de las estrellas y a la aparición de vida. Ese delicado equilibrio entre la tasa de desintegración del neutrón y el ritmo de enfriamiento del cosmos resultó esencial para la creación de los elementos que componen nuestro planeta y todo lo que hay en él.

A partir de los datos astronómicos, resulta posible inferir la abundancia relativa de hidrógeno y helio en el cosmos, así como la de deuterio y otros núcleos ligeros. Pero, para comprobar si esos datos concuerdan con los predichos por la teoría, necesitamos conocer con exactitud la vida media del neutrón. Sin un valor preciso, nuestra capacidad para comparar teoría y observaciones se ve limitada. Un acuerdo aumentaría nuestra confianza en la teoría de la gran explosión, mientras que una discrepancia podría indicar que en la nucleosíntesis primordial también intervinieron partículas exóticas, como algún tipo adicional de neutrino.

Una manera de analizar el desacuerdo entre ambos experimentos consistiría en emplear un tercer método igual de preciso que los anteriores pero propenso a otros errores sistemáticos. A tal fin, varios grupos en todo el mundo están intentando desarrollar experimentos alternativos. Los físicos del Complejo de Investigación del Acelerador de Protones de Japón (J-PARC), en Tokai, trabajan en una nueva técnica para detectar los electrones generados en la desintegración beta (en lugar de los protones). Por otro lado, los grupos del ILL, del Instituto de Física Nuclear de San Petersburgo, del Laboratorio Nacional de Los Álamos y de la Universidad Técnica Johannes Gutenberg, en Maguncia, están explorando la interesante posibilidad de confinar los neutrones en un campo magnético en lugar de en un recipiente. Ello es posible porque, a pesar de carecer de carga eléctrica, los neutrones se comportan como un pequeño imán. El número de neutrones que escaparían de una trampa magnética debería diferir bastante del número de neutrones que abandonan un contenedor, lo que daría lugar a efectos sistemáticos muy distintos.

Esperamos fervientemente que, en un futuro, tanto los experimentos en curso como la nueva generación de técnicas permitan resolver de una vez por todas el rompecabezas de la vida media del neutrón. IyC

PARA SABER MÁS

Measurement of the neutron lifetime using a gravitational trap and a low-temperature fomblin coating. A. Serebrov et al. en *Physics Letters B*, vol. 605, n.° 1-2, págs. 72-78, enero de 2005.
The neutron lifetime. Fred E. Wietfeldt y Geoffrey L. Greene en *Reviews of Modern Physics*, vol. 83, n.° 4, art. 1173, octubre-diciembre de 2011.
Improved determination of the neutron lifetime. A. T. Yue et al. en *Physical Review Letters*, vol. 111, n.° 22, art. 222.501, noviembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Neutrones ultrafríos. R. Golub et al. en *IyC*, agosto de 1979.
El problema del radio del protón. J. C. Bernauer y R. Pohl en *IyC*, abril de 2014.

ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

EL COSTE DE LOS RECURSOS EN UN PLANETA QUE CAMBIA

Al empezar este siglo, la fracción de la producción mundial dedicada a energía y alimentación era la más reducida de la historia. Puede que esa situación no vuelva a darse

Carey W. King

EL ACTUAL DEBATE EN TORNO A LA TECNOLOGÍA Y LOS RECURSOS ENERGÉTICOS REBOSA DE NOticias, opiniones y enfoques contradictorios planteados desde posturas extremas. No es de extrañar que el ciudadano de a pie se encuentre confundido. Según las fuentes que consultemos, tan pronto la perforación horizontal y la fracturación hidráulica han situado a Estados Unidos al borde de la independencia energética como han causado la insolvencia de las compañías de gas y petróleo, que estarían gastando más dinero del que recuperan con las ventas. Por su parte, las energías renovables pueden tanto cubrir de forma obvia nuestras necesidades como suponer un camino subvencionado hacia la ruina económica.

En la inmensa mayoría de los casos, las posturas extremas son una hipérbole de una realidad mucho más sutil. Es imprescindible que sopesemos nuestras futuras opciones energéticas en consonancia con las tendencias biofísicas y socioeconómicas. De lo contrario, corremos el riesgo de tratar solo los síntomas y no las causas.

Una buena manera de entender mejor las cuestiones energéticas, sobre todo para el consumidor medio, consiste en poner los números en un contexto práctico. Por ejemplo, de un análisis de datos que he realizado recientemente se desprende la siguiente conclusión esencial: el cambio de siglo representó un importante punto de inflexión social, pues nunca el mundo había conocido comida y energía tan baratas.

En los países desarrollados, y probablemente en el mundo en general, la tendencia a que unos crecientes servicios de comida y energía consuman una proporción cada vez menor de nuestra producción económica (medida por el producto interior bruto, el PIB) parece haber llegado a su fin, quizá para siempre. Las consecuencias son de extrema importancia para el futuro crecimiento económico y las relaciones sociales, sobre todo

© MERIEL JANE WAISSMAN/ISTOCKPHOTO



teniendo que afrontar las bajas tasas de crecimiento que siguen caracterizando a la economía mundial.

Resulta prácticamente imposible alterar de forma significativa muchas de las causas a largo plazo de la evolución del coste de la energía y la comida. En consecuencia, la capacidad de nuestro sistema energético para facilitar el cumplimiento de objetivos ambientales y socioeconómicos depende principalmente del uso de la tecnología para consumir menos energía y hacer frente a lo obvio: que la Tierra es un planeta finito.

Carey W. King es director adjunto del Instituto de la Energía y trabaja en la Escuela Jackson de Ciencias de la Tierra y la Escuela McCombs de Comercio, ambas de la Universidad de Texas en Austin.



CALCULANDO COSTES

Consideremos el planeta tal como era hace 200 años, antes de la industrialización y del incesante consumo de combustibles fósiles. En ese mundo, la biomasa (la leña, por ejemplo) y la comida constituían los combustibles dominantes. La comida y el forraje eran la fuente de energía de las principales fuerzas motrices de aquellas sociedades (como todavía ocurre en buena parte del mundo no desarrollado): los músculos humanos y los animales que trabajan la tierra. Si bien los molinos de viento y de agua utilizaban recursos renovables, la biomasa era lo que hacía funcionar en su mayor parte a la sociedad. Por tanto, en una perspectiva a largo plazo, debemos considerar la comida como parte de las fuentes de energía del planeta.

¿Cómo podemos medir si la energía es barata o cara? Muchos creen que los precios son los índices que distinguen entre lo caro y lo barato: cuántos dólares cuesta un litro de gasolina o cuántos céntimos cuesta un kilovatio hora de electricidad. Sin embargo, la evolución de los precios solo nos cuenta la mitad de la historia. La otra mitad nos la da la cantidad de comida y energía que compra la población. Los precios nos informan sobre lo que consumimos, pero en sí mismos no expresan cuánto gastamos en total.

Por ello resulta útil calcular la proporción de gasto en energía-comida: los gastos totales (precio × consumo) en comida y energía con respecto al PIB (y también como porcentaje de los ingresos personales). Cuanto más baja sea la proporción de gasto en energía-comida, más fácil resultará cubrir las necesidades básicas y más dinero quedará a nuestra disposición para la innovación y el consumo de productos, servicios e industrias discrecionales (como el cine o las vacaciones). Claro está, si aumenta la proporción, ocurre lo contrario.

Los historiadores económicos han reunido datos para estimar cómo ha evolucionado el gasto en energía desde hace más de cien años. Los datos de Roger Fouquet, de la Escuela de Economía de Londres, (para el Reino Unido e Inglaterra desde el año 1300) y Astrid Kander, de la Universidad de Lund, (para Suecia desde 1800) permiten comprender las tendencias de los costes energéticos durante la transición a los combustibles fósiles.

En el Reino Unido, los gastos en energía con respecto al PIB solo se situaron por debajo del 20 por ciento a partir de 1830, y en Suecia, solo después de 1920 (principalmente porque el carbón, más barato, no se adoptó hasta más tarde). La energía más barata de la historia del Reino Unido fue la de mediados de la primera década del presente siglo, y los datos relativos a Suecia muestran una proporción constante de coste energético desde mediados de los años ochenta hasta el año 2000. Los costes energéticos del mundo desarrollado han sido menores durante los últimos 100 años que en los 600 anteriores.

La Oficina de Análisis Económico de EE.UU. cuenta con datos relativos a un intervalo de tiempo menor, pero también refleja la disminución de los costes de energía y alimentación en el país. La proporción del PIB correspondiente a la energía y a la comida compradas por los consumidores estadounidenses decreció a lo largo de 70 años hasta 2002. Sin embargo, a partir de ese año la tendencia se invirtió y la energía y la comida comenzaron a tornarse más caras.

Considerando los gastos energéticos a escala mundial (dejando a un lado la comida) desde 1978, el mínimo se alcanzó alrededor de 1998, en buena parte debido a unos precios del petróleo muy bajos. Los gastos mundiales en producción de comida también han dejado de disminuir en los últimos diez años. Al combinar los datos a nivel mundial sobre gastos en energía y comida, se demuestra que la tendencia mundial de los costes, expresados como porcentaje del PIB, alcanzó su mínimo alrededor del año 2000. Por tanto, teniendo en cuenta una tendencia que perduró más de 200 años en el Reino Unido y en Suecia, 70 años en EE.UU. y 30 años a nivel global, los datos apoyan la conclusión de que la entrada en el siglo XXI supuso el momento en que tuvimos a nuestra disposición la energía y la comida más baratas de la historia, y de que actualmente esa trayectoria se está invirtiendo.

ENVEJECIMIENTO E INFRAESTRUCTURAS

Según la llamada ley de Stein, formulada el pasado siglo por el economista Herbert Stein, «si algo no puede continuar para siempre, se detendrá». Al aplicarla al decrecimiento de la proporción del coste de la comida y la energía, se desprende que dicha proporción no podría decrecer indefinidamente a menos que la energía y la comida se vuelvan gratuitos o el PIB creciese hasta el infinito, circunstancias que difícilmente van a darse en un planeta finito. Además, una serie de factores hacen improbable que la tendencia de los últimos años se invierta y que el mundo llegue a pagar por la comida y la energía menos que en el cambio de siglo.

EN SÍNTESIS

Antes de la industrialización, las principales fuentes de energía eran la biomasa y la comida. El ulterior predominio de los combustibles fósiles fue acompañado por una disminución del gasto en energía y alimentación como porcentaje del producto interior bruto (PIB).

La fracción del PIB mundial gastado en energía y alimentación alcanzó un mínimo hacia el año 2000, pero desde entonces esa tendencia se ha invertido. Entre otros factores, el fenómeno guarda relación con el envejecimiento de las poblaciones y las infraestructuras.

La proporción del PIB dedicada a energía y comida puede entenderse como un indicador sistémico del funcionamiento de una economía. En particular, las grandes recesiones económicas recientes han coincidido con elevados gastos energéticos con respecto al PIB.



MÍNIMO HISTÓRICO: A lo largo del la historia, la fracción de la producción que debía destinarse a energía y comida ha venido disminuyendo progresivamente. A medida que los recursos energéticos básicos —como la energía humana y animal o la leña— se iban sustituyendo por combustibles fósiles, la población dedicaba una fracción cada vez menor de sus ingresos a cubrir sus necesidades básicas. Sin embargo, esa tendencia alcanzó un mínimo en el último cambio de siglo. El fenómeno obligará a dar un giro hacia nuevas tecnologías y fuentes de energía a fin de reducir el consumo energético.

TODAS LAS ILUSTRACIONES: RUSSELL HOUSE/*AMERICAN SCIENTIST*

Uno de esos factores es la población. Las poblaciones de seres vivos crecen exponencialmente hasta que encuentran algo que restringe su crecimiento. La reducción de la tasa de crecimiento demográfico es una reacción sistémica natural ante las retroalimentaciones negativas que se derivan de los rendimientos cada vez menores reportados por el aumento de la población en un espacio, tiempo y conjunto de recursos finitos. Los datos de las Naciones Unidas (ONU) demuestran que la tasa mundial de crecimiento demográfico tras la Segunda Guerra Mundial alcanzó un pico en 1968, y que desde entonces ha disminuido paulatinamente año tras año. Es decir, la relación coste-beneficio asociada a tener hijos está aumentando debido a las restricciones inherentes a vivir en un planeta finito. Sin embargo, la población sigue creciendo y, si no cambian los demás los factores, un mundo más poblado requiere a la vez más comida y una mayor producción y distribución de energía. Como el gasto en energía y comida con respecto al PIB alcanzó su mínimo alrededor del año 2000, hoy resulta más costoso mantener a ese mayor número de habitantes.

Por otra parte, al disminuir las tasas de crecimiento de las poblaciones, estas envejecen. Las estimaciones de la ONU indican que en 2010 se alcanzó un mínimo en la tasa de dependencia por edad. Este índice se calcula como el cociente entre la población que, por su edad, no trabaja, y la que por la suya normalmente sí lo hace. Por tanto, cuanto menor sea la tasa de dependencia, más fácil será para los que están en edad laboral mantener a los que no lo están. Desde la década de 1960, el número de personas en edad laboral aumentó más rápidamente que el número de personas dependientes por la edad. Pero, a partir de 2010, veremos la tendencia contraria. En los años noventa, Japón fue la primera nación industrializada que se encontró con ese cambio en la evolución demográfica. Europa y EE.UU. lo experimentan en la actualidad.

A medida que se ralentiza la expansión de nuestras infraestructuras energéticas, estas también se vuelven más viejas, como ocurre con las poblaciones. En un trabajo reciente, he calculado una tasa de dependencia para la generación eléctrica en EE.UU. dividiendo la parte de la capacidad total cuya edad supera un determinado valor (por ejemplo, 40 años) entre la parte de la capacidad total de menor edad. El país nunca ha tenido un conjunto de activos de generación eléctrica tan viejos como los actuales. Desde finales de la década de los setenta, EE.UU. viene dependiendo de centrales eléctricas cada vez más viejas.

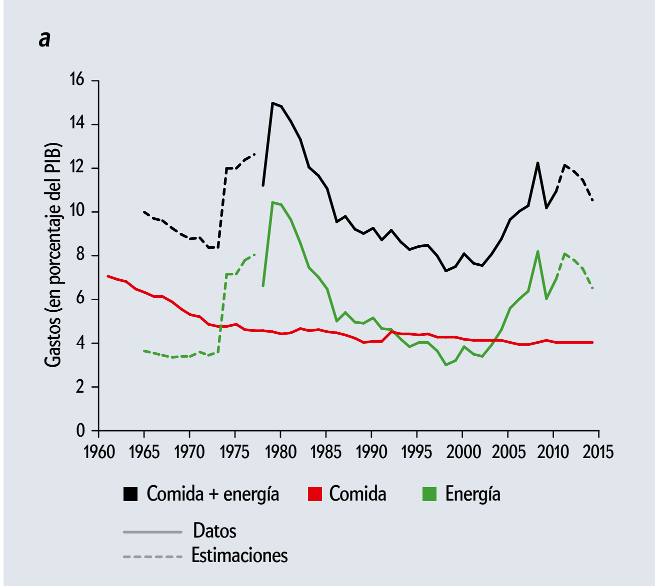
La previsión de la Administración de Información sobre Energía (EIA) estadounidense respecto a la construcción de nuevas centrales eléctricas apunta a que el conjunto de las centrales del país continuará envejeciendo. Pero las centrales eléctricas no duran indefinidamente y, además, requieren mantenimiento. Si se quiere que aumente la capacidad total de generar electricidad, deberá instalarse nueva capacidad a un ritmo más rápido que el de desaparición de la ya existente. El mantenimiento y el reemplazo de centrales eléctricas, aunque solo sea para que permanezca constante la capacidad total, consume recursos que históricamente se destinaban a que esta creciese.

Al envejecimiento de las centrales eléctricas de EE.UU. se suma el hecho de que el país ya no aumenta su consumo de electricidad. Del mismo modo que el aumento de la población implica unos rendimientos decrecientes, lo mismo ocurre con el aumento del consumo eléctrico y la capacidad de generación. Puesto que la demanda total de electricidad en EE.UU. es constante (en algunos estados está decreciendo y en unos pocos aumentando), no existe un gran incentivo para instalar nuevas centrales eléctricas. Por tanto, la solución reside en invertir en incrementos de capacidad más modestos. Esa es la razón de que las inversiones más recientes se hayan centrado en la eficiencia energética, la gestión de la demanda y la construcción

¿Cambio de tendencia?

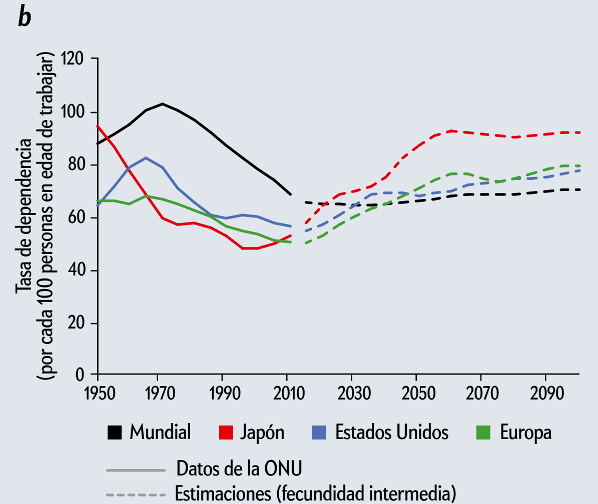
El autor y sus colaboradores han agregado los datos de los distintos países para determinar la evolución de los gastos mundiales en energía y alimentación con respecto al producto interior bruto (PIB). Dichos gastos alcanzaron un mínimo hacia el año 2000, pero desde entonces esa tendencia se ha invertido (*a*). El fenómeno guarda relación con el envejecimiento de las poblaciones y de las infraestructuras, cuantificables en las correspondientes «tasas de dependencia» (*b* y *c*). A su vez, una descarbonización de la economía impulsada por tasas a las emisiones de carbono podría conllevar un gasto aún mayor (*d*).

a



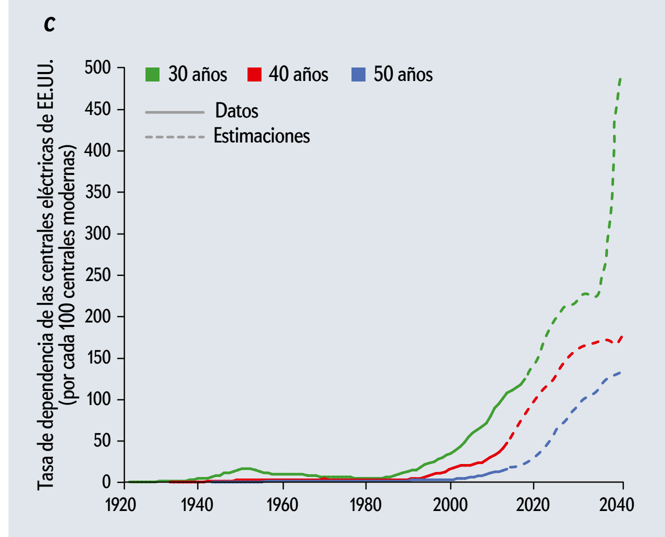
PUNTO DE INFLEXIÓN: Los gastos mundiales en comida y energía como fracción del PIB alcanzaron un mínimo histórico alrededor del año 2000. Desde entonces, vienen mostrando una tendencia ascendente.

b



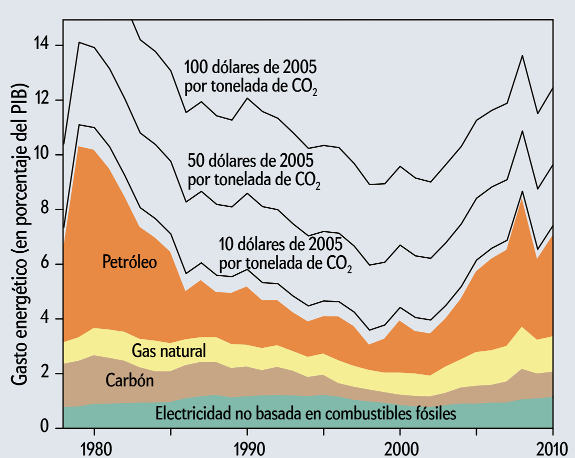
ENVEJECIMIENTO DE LA POBLACIÓN: La tendencia anterior puede relacionarse con la evolución de la tasa de dependencia, calculada como el cociente de la población que no está en edad laboral (aquí, con menos de 20 o más de 69 años) y la que sí lo está. Cuanto mayor sea esa proporción, más difícil resultará para los que trabajan mantener a los que no lo hacen. Se prevé que dicha tasa aumente a partir de 2010.

c



ENVEJECIMIENTO DE LAS INFRAESTRUCTURAS: De igual modo, mantener infraestructuras energéticas muy antiguas incrementa el gasto en energía. También en este caso puede calcularse una «tasa de dependencia», definida como el cociente de las infraestructuras cuya edad supera una edad determinada (aquí, 30, 40 y 50 años) y aquellas cuya edad está por debajo. Esta gráfica muestra el caso de Estados Unidos. Nunca antes el país había tenido un conjunto de centrales más viejo que el actual.

d



COSTES ENERGÉTICOS: El porcentaje del PIB mundial destinado a la energía depende de las distintas fuentes (*colores*), pero todavía está dominado en gran parte por el petróleo (*naranja*). Una descarbonización de la economía impulsada por tasas a las emisiones de CO_2 podría aumentar el gasto energético. Las líneas negras representan el coste total que implicarían distintos impuestos a las emisiones de carbono en caso de que el resto de los factores permaneciesen constantes.

FUENTES: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO) (*a, gasto en alimentación*); BP Y ADMINISTRACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE ENERGÍA (EIA) DE EE.UU. (*a, estimación de los gastos en energía*); NACIONES UNIDAS (*b*); «COMPARING WORLD ECONOMIC AND NET ENERGY METRICS» PARTES I, II Y III. CAREY W. KING ET AL. EN *ENERGIES*, VOL. 8, 2015 (*resto de los datos*)

de centrales de gas natural, eólicas y fotovoltaicas de menor capacidad que las grandes centrales de carbón y nucleares.

GASTAR ENERGÍA PARA PRODUCIR ENERGÍA

Así como una infraestructura energética más vieja implica llevar a cabo más reparaciones, el mantenimiento de las estructuras y la producción energética requieren a su vez un aporte de energía. Dado que desde el año 2000 ha aumentado nuestro gasto general en energía, mantener el equilibrio plantea un dilema. Nuestros suministros energéticos adicionales se están volviendo más caros, ya que cada vez necesitamos un mayor aporte energético para producir la misma cantidad de energía a partir de nuevos recursos.

Pongamos como ejemplo las arenas bituminosas de Canadá, que en la década pasada se convirtieron en una reserva energética económicamente viable. Las arenas son bastante más caras de explotar que el petróleo común, pues se debe emplear una gran cantidad de energía para crear el vapor que se inyecta en el subsuelo a fin de extraer el bitumen. Por cada unidad de energía aportada en la explotación de las arenas se sacan menos de 6 unidades de energía contenidas en el bitumen. Las industrias del gas y del petróleo en EE.UU. han producido tradicionalmente entre 10 y 20 unidades de energía por cada unidad de energía empleada. Teniendo en cuenta los aportes energéticos posteriores consumidos en refinar el petróleo para elaborar productos como la gasolina y el combustible aéreo, las arenas bituminosas generan menos de 3 unidades de energía, mientras que la gasolina ha generado históricamente entre 5 y 10.

Cuanto menor sea la razón entre energía generada y aportada, mayor será el coste energético. Y esa ecuación también determina en gran medida qué fuentes de energía pueden explotarse económicamente. En la actualidad, recursos como las lutitas bituminosas ricas en querógeno de la cuenca del Piceance, en Colorado, presentan una razón demasiado baja para poder explotarlas. Lamentablemente, muchos biocombustibles presentan también razones demasiado bajas (excepto la caña de azúcar del sureste de Brasil, empleada en la producción de etanol y electricidad), y todos están limitados por la productividad del terreno y el clima. Pero ¿podemos volvernos más eficientes, de modo que resulte posible consumir esos combustibles más caros?

EFICIENCIA Y CONSUMO

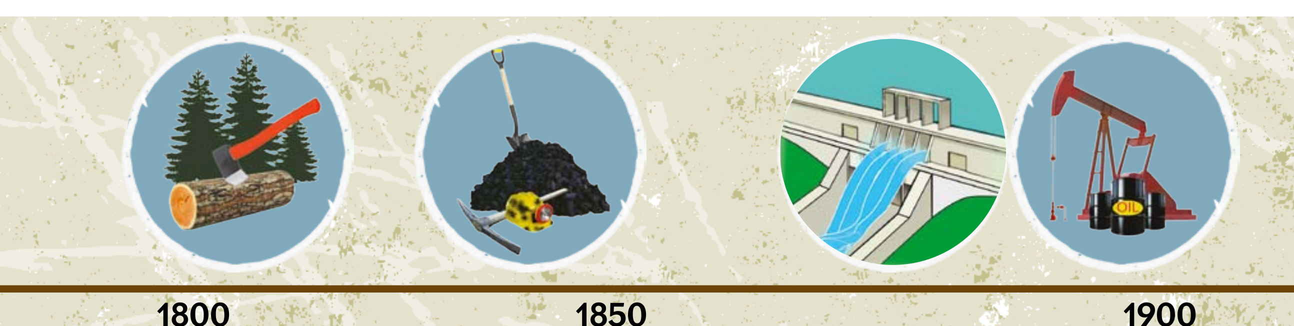
Una respuesta general ante el aumento de los costes es mejorar la eficiencia del uso de los recursos, tanto en términos de energía como de capital. Sin embargo, el economista británico William Stanley Jevons observó en 1865 que, a menudo, los avances tecnológicos que mejoraban la eficiencia del uso energético causaban que las industrias aumentaran su consumo de energía. Debido a ese efecto de «rebote», conocido como paradoja de Jevons, la eficiencia puede acabar fomentando un crecimiento que, de lo contrario, no se produciría.

Consideremos, por ejemplo, la eficiencia en el uso de combustible en los automóviles. En 1970, los estadounidenses recorrieron en sus coches y camiones 1,7 billones de kilómetros y consumieron, con un rendimiento medio de 5,74 kilómetros por litro en coche y 4,25 en camión, 300.000 millones de litros de combustible. En aquella época, el precio medio de la gasolina era de 9,87 céntimos de dólar por litro, así que los costes de combustible alcanzaron 27.000 millones de dólares, o el 2,7 por ciento del PIB. En 2012, el rendimiento era de 10,59 y 7,86 kilómetros por litro para coches y camiones, respectivamente, y en conjunto se recorrieron 4,3 billones de kilómetros y se consumieron 469.000 millones de litros. Con la gasolina a 0,97 dólares por litro, los costes de combustible alcanzaron los 457.000 millones de dólares, o un 2,8 por ciento del PIB. No es coincidencia que en 1970 y 2012 los costes de combustible en relación con el PIB fueran prácticamente iguales, ya que los consumidores ajustan sus hábitos a la tecnología disponible y a los precios de la energía.





ADAPTACIÓN AL CAMBIO: Los consumidores adaptan sus hábitos a la tecnología disponible y a los precios de la energía. En 1970, los automóviles recorrían un promedio de 5,74 kilómetros por litro de gasolina. En 2012, esa media se situó en 10,59. Sin embargo, el porcentaje del PIB estadounidense destinado a viajar en coche se mantuvo constante. La generación del cambio de milenio se está adaptando a los costes crecientes que suponen los automóviles conduciendo menos y recurriendo a opciones novedosas, como compartir vehículos.



RETORNO ENERGÉTICO: Las fuentes de energía disponibles han ido cambiando en el curso de los dos últimos siglos. De la madera y el carbón en el siglo XIX, se pasó más tarde al los demás combustibles fósiles y a la energía hidroeléctrica, nuclear y la fotovoltaica, entre otras. En general, qué fuentes conviene explotar depende de la relación entre la energía que hay que invertir para extraer el recurso y la energía que este puede generar. Dicha proporción determina en muy buena medida el coste final.

Si no hubiera mejorado el consumo de los automóviles, seguramente los estadounidenses solo se habrían podido permitir conducir una fracción de esos 4,3 billones de kilómetros que se recorrieron en 2012.

Hoy en día, el coste total que supone tener un coche (plazos, combustible, aparcamiento, etc.) resulta cada vez más inasequible, o incluso innecesario, para la generación urbana del cambio de milenio, que pronto llegará a la franja de edad en que más se conduce, entre los 35 y 54 años. Dicha generación ya ha influenciado a la franja de edad de entre 16 y 34 años conduciendo un 23 por ciento menos de kilómetros entre 2001 y 2009 que los recorridos por generaciones previas. Los datos demográficos generales también apuntan a que se conducirá menos (la gente de mayor edad conduce menos, y nuestra población está envejeciendo). Las deudas de los estudiantes, la congestión urbana y las redes sociales, entre otros factores, forman parte de una serie de «cambios adaptativos complejos» dentro del sistema socioeconómico estadounidense que derivan en una menor conducción. Tal y como señaló el Fondo Educativo del Grupo de Investigación por el Interés Público de EE.UU., tales cambios indican que la mayoría de los pronósticos relativos al uso del automóvil están inflados.

La generación del cambio de milenio parece inclinarse cada vez más por el alquiler temporal de vehículos y los recorridos en coche compartido, un ejemplo de combinaciones tecnológicas disruptivas que pueden sortear ciertas limitaciones socioeconómicas. Recurrir a esos servicios de transporte es menos cómodo que poseer vehículo propio y garaje, pero reduce significativamente los gastos y supone un uso más eficiente del capital automovilístico existente. Por tanto, los nuevos servicios gozan de tanto apoyo por parte de la población que a los políticos les es difícil frenar el fenómeno para proteger intereses basados en el *statu quo* (como los servicios de taxi).

DISTRIBUCIÓN DESIGUAL

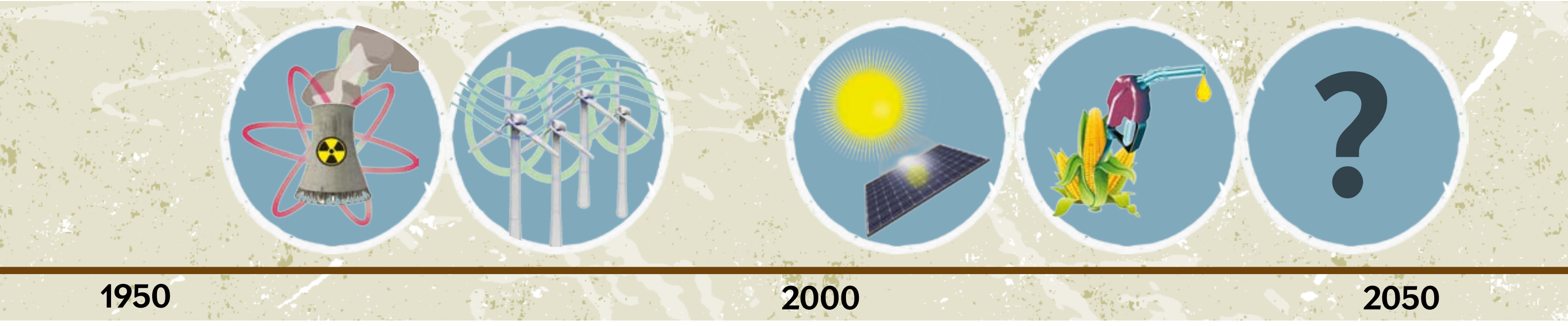
Otro factor que influye en la distribución del consumo energético es la desigualdad, tanto la existente dentro de un territorio nacional como entre países. A consecuencia de la crisis del petróleo de los años setenta, las economías de los países occidentales desarrollados tuvieron que reaccionar por primera vez ante el hecho de que no poseían pleno control sobre los recursos finitos de la Tierra. Otras poblaciones podían tomar decisiones que afectaban al estilo de vida occidental. EE.UU. ya no contaba con crecientes cantidades de petróleo barato de producción propia que le permitiesen ir pagando deudas (como las de la guerra de Vietnam) sin dejar de ofrecer a sus ciudadanos un estilo de vida de clase media.

Desde la crisis financiera y la Gran Recesión que empezaron a finales de 2007, la desigualdad en materia de ingresos y riqueza se ha convertido en una cuestión central. Los ingresos per cápita y el consumo energético van de la mano. Una persona con mayores ingresos consume más energía tanto de forma directa (combustible y electricidad) como incorporada en productos (sus compras). Entre 1950 y 1980, EE.UU. y Europa occidental alcanzaron unas cotas sin precedentes en igualdad de ingresos. La energía barata y las políticas de redistribución permitían a la clase media estadounidense gozar de una vida cómoda. El economista Thomas Piketty ha señalado que esas cotas de igualdad durante de las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial fueron posibles debido a la gran cantidad de bienes que se destruyeron durante la guerra. En otras palabras, no es que los pobres se enriqueciesen, sino que los ricos se empobrecieron.

Desde 1980, las economías desarrolladas se han vuelto claramente menos igualitarias en términos de ingresos y distribución de la riqueza, debido a una serie de cambios en las políticas nacionales (como unos impuestos sobre el capital más bajos y unas menores retribuciones del trabajo no dinerarias) y a la influencia de la globalización. El físico Victor Yakovenko, de la Universidad de Maryland, ha calculado que, desde 1980 hasta 2010, la distribución del consumo energético per cápita entre países se ha vuelto más igualitaria. La misma tendencia se cumplía con los ingresos. A medida que se ha globalizado la fabricación de productos, los países en vías de desarrollo se han beneficiado de la disminución de la igualdad en los países desarrollados. Hoy, los estadounidenses necesitan dos fuentes de ingresos en el hogar para mantener los niveles de los años setenta, mientras que los asiáticos han aumentado sus ingresos gracias a nuevos puestos de trabajo en las fábricas y en el sector servicios. Tomando en cuenta específicamente a los países en vías de desarrollo, el economista Martin Ravallion, del Banco Mundial, ha demostrado no hace mucho que la desigualdad total (sumando la desigualdad entre naciones a la existente dentro de los propios países) se redujo entre 1980 y 2005. Y probablemente no sea una coincidencia que la desigualdad de los países en vías de desarrollo haya aumentado entre 2005 y 2010, a la vez que crecían los precios de la comida y la energía.

LA OPCIÓN DE LA DEUDA

Si la desigualdad de los países en vías de desarrollo ha dejado de reducirse, y si los hogares de los países desarrollados han



experimentado una creciente desigualdad de ingresos en las últimas décadas, ¿de qué modo puede aumentar el consumo? Quizá podamos simplemente pedir prestado para incrementarlo. Los economistas Carmen M. Reinhart y Kenneth Rogoff afirman en su libro *Esta vez es distinto: Ocho siglos de necedad financiera* (Fondo de Cultura Económica de España, 2011) que «raramente las crisis financieras se producen en un vacío». La crisis financiera mundial que comenzó en 2007 no fue una excepción. Se desarrolló en una atmósfera de ignorancia económica sobre la influencia de la deuda y sobre la dependencia de la economía de los recursos biofísicos presentes en el medio.

Reinhart y Rogoff señalan que el sistema sufre de ordinario un choque real (es decir, no financiero) y, como reacción a este, se producen retroalimentaciones financieras que amplifican la situación. Aunque no se los considere un choque (*shock*) tal y como definen este concepto los economistas, los mínimos en el coste proporcional de la energía y la comida y en la tasa de dependencia relativa al envejecimiento de la infraestructura energética son choques que tienen lugar a lo largo de escalas temporales demográficas de cientos de años.

Según un estudio elaborado en 2015 por el Instituto Global McKinsey, entre 2000 y 2007 la deuda mundial aumentó desde un 246 hasta un 269 por ciento del PIB, debido principalmente a las deudas de los hogares y del sector financiero. A comienzos del presente siglo reinaban altas expectativas económicas basadas en la globalización y en Internet, ambas propiciadas por el bajo coste de la energía y la comida. Como consecuencia, los estadounidenses firmaron hipotecas y pidieron créditos con la garantía de un previsible aumento del precio de la vivienda. Los bancos sabían que las hipotecas no podrían pagarse, pero estaban incentivados por las comisiones hipotecarias, que seguirían percibiendo mientras la fiesta no se acabase. Solo en 2007 se hizo evidente para el mundo desarrollado que la presión de China sobre unos recursos naturales cada vez más escasos había elevado los precios hasta tal punto que obstaculizaba las expectativas económicas, financiadas con deudas, de los países desarrollados.

Entonces, entre 2007 y 2014, la deuda global aumentó desde el 269 hasta el 286 por ciento del PIB, una tasa de crecimiento menor que durante los siete años anteriores pero que, en esta ocasión, respondió a un aumento de la deuda pública a medida que los Gobiernos trataron de lanzarse al rescate comprando activos cada vez menos valiosos a las aseguradoras y a los bancos de inversión privados. Lamentablemente, tales medidas de política monetaria no afectan a la economía real con sus limitaciones biofísicas, que es donde residen los precios de la comida y la energía, y la deuda global continúa creciendo más rápido que el PIB.

La principal estrategia de los bancos centrales para tratar de incitar el crecimiento económico consiste en bajar los tipos de interés y abaratar así el crédito. Las naciones ya han contraído en otros tiempos deudas cuantiosas y han visto precios elevados de la energía, pero los tipos de interés de los bancos centrales son hoy más bajos que nunca. La media histórica de los tipos controlados por los bancos centrales se sitúa alrededor del 5 por ciento. Sin embargo, los tipos de la Reserva Federal, el Banco de Inglaterra y el Banco de Canadá han permanecido por debajo del 1 por ciento desde 2009. El del Banco de Japón también se ha mantenido por debajo de ese valor desde 1996.

Dado que los tipos de interés casi nulos dejan poco margen a los bancos centrales para maniobrar (aunque alguno, como el de Suecia, ha impuesto tipos negativos), se han adoptado medidas de «expansión cuantitativa» (*quantitative easing*). Esta consiste en que los bancos centrales compren a las entidades comerciales un volumen mayor de activos, creando para ello nuevo dinero que se añade a las reservas bancarias; la composición de los activos del banco central también puede cambiar así.

En teoría, los bancos comerciales estarían así más dispuestos a conceder nuevos préstamos. El problema de ese planteamiento reside en que, en realidad, el proceso del crédito funciona en sentido contrario. Los bancos comerciales hacen dinero al conceder préstamos a empresas que confían en que sus clientes comprarán sus productos. Más que ser los responsables de la creación de dinero, los bancos centrales responden a la creación de dinero. Sin embargo, la desigualdad y la deuda de los consumidores han alcanzado cotas tan altas que el consumidor medio no tiene dinero suficiente para comprar mucha más cantidad de nada. Por tanto, aunque hoy pedir un crédito es más barato que en cualquier otra época de la era industrial moderna, las expectativas actuales sobre un crecimiento futuro son demasiado bajas e inciertas como para que las empresas y los consumidores pidan prestado más dinero. Con todo, hay quienes creen que este es el momento ideal para un nuevo tipo de inversión.

EL MERCADO DEL CARBONO

Para muchos, la respuesta está clara: deberíamos tomar prestado el dinero barato de hoy para crear la economía con bajas emisiones de carbono del mañana. «Descarbonizar» nuestros sistemas energéticos resulta controvertido por multitud de razones, pero todas ellas se reducen al desacuerdo sobre cuál es su relación entre costes y beneficios. La toma en consideración de los costes secundarios de las emisiones de CO_2 procedentes de los combustibles fósiles lleva a un aumento del precio que pagamos por la energía. Es decir, encarece la energía basada en combustibles fósiles, pero no abarata las energías renovables. La imposición de un precio o tasa sobre las emisiones de CO_2 relacionadas con la producción eléctrica eleva directamente el coste de la energía obtenida a partir del gas natural y del carbón, mientras que solo aumenta en mucha menor medida —y de

forma indirecta— el de la energía nuclear, eólica y solar, cuya generación no libera CO_2.

Las grandes recesiones han coincidido con altos gastos energéticos con respecto al PIB, como ocurrió en la década de los setenta y en el período 2007-2009. Añadir a la energía los gastos relativos al CO_2 no hace sino aumentar los gastos en «energía + CO_2». En caso de que exista un porcentaje limitante del PIB que puede gastarse en «energía + CO_2» antes de que la cota alcanzada cause o coincida con una recesión, a medida que los gastos energéticos aumentan, los precios de mercado del CO_2 deberían reducirse (y, con ellos, el gasto correspondiente). Ese ha sido exactamente el comportamiento del precio del carbono en el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea. Los responsables de la Unión Europea partieron de que la economía siempre crecería y que el precio de mercado de las emisiones de carbono aumentaría, lo que motivaría nuevas inversiones que implicaran menos CO_2. Sin embargo, desde 2008 se ha observado una situación distinta, en la que ha ocurrido exactamente lo contrario: en lugar de un elevado crecimiento económico que induce un alto precio del carbono, se ha producido un crecimiento económico nulo o reducido que ha derivado en un precio bajo.

El tándem «energía + CO_2» plantea una cuestión de prioridades: ¿tratarán los países de cumplir con las reducciones necesarias de CO_2 si sus economías ya están decreciendo o paralizándose? Un alto número de estudios predicen que una penalización por las emisiones (es decir, un impuesto o un precio sobre las mismas) de entre 50 y 100 dólares por tonelada de CO_2 incentivaría una transición hacia una economía con menos carbono. Sin embargo, aun en la época con la energía más barata de la historia (1998-2002), ese precio del carbono habría causado un gasto mundial primario en «energía + CO_2» (sin incluir la comida) situado entre el 7 y el 10 por ciento del PIB. Los únicos períodos de los últimos cien años con unos gastos energéticos mundiales similares fueron 1979-1980 y el año 2008. En el primer caso, la producción de la OPEP disminuyó en más de 8 millones de barriles de petróleo al día (el 13 por ciento de la producción mundial en aquel momento) debido a la revolución iraní y los subsecuentes conflictos. Como resultado, los precios del petróleo se dispararon y el mundo desarrollado entró en recesión. Por tanto, la historia reciente demuestra que los altos costes energéticos coinciden con un crecimiento económico bajo o en declive. Nuestro futuro a corto plazo podría quedar definido por la medida en que estemos dispuestos a aceptar esa correlación o a combatirla, al mismo tiempo que invertimos para obtener los beneficios medioambientales de la descarbonización.

UN PLANETA FINITO

Primero suministramos energía a nuestros cuerpos y, después, una vez cubierta esa necesidad, utilizamos cualquier excedente energético para que lo que denominamos «economía» funcione y, quizá, crezca. Llevamos 200 años usando una densidad energética cada vez mayor y unas alternativas energéticas cada vez más baratas (y limpias). Sin embargo, desde el año 2000 no se ha prolongado esa tendencia. Si bien las tecnologías energéticas continúan progresando, como los paneles solares fotovoltaicos o las técnicas de fracturación hidráulica para extraer petróleo y gas, en los últimos 15 años hemos estado pagado más, no menos, por la comida y por la energía.

Dado que más del 80 por ciento del consumo mundial de energía primaria sigue estando asociado a los combustibles fósiles, el aumento del gasto energético que se ha observado desde el año 2000 guarda relación con ese tipo de fuentes. Pese a que en 2015 los precios del petróleo fueron claramente más bajos que en el período 2010-2014, los gastos superaron los de 1998-2002. Cada vez en más lugares, la instalación adicional de tecnologías para generar electricidad a partir de recursos renovables, como la radiación solar y el viento, cuesta menos que cualquier opción basada en combustibles fósiles. Por tanto, algunos expertos sostienen que podemos prescindir de forma fácil y asequible de las tecnologías que extraen y convierten reservas de energía fósil, y sustituirlas con tecnologías de energía renovable que explotan flujos de energía (como la luz solar, el viento y las olas). Estamos muy lejos de habernos acercado a cualquier limitación técnica o de recursos que imposibilite la integración de la energía renovable industrial moderna. Pero una cosa es afirmar que hoy las energías eólica y solar son competitivas cuando de lo que se trata es de instalar la siguiente central eléctrica, y otra pensar que, en un mundo con un cien por cien de energías renovables, podremos gastar una proporción tan baja del PIB en energía y comida como la actual sin que en los países desarrollados tengamos que reducir nuestros actuales niveles de vida.

Nuestro planeta no es plano ni tampoco infinito, independientemente de lo que puedan dar a entender algunos modelos económicos y ciertos gurús. La proporción del PIB gastada en comida y energía es un indicador sistémico que depende, a su vez, de las múltiples retroalimentaciones de nuestro complejo mundo. Hasta hoy, el ingenio humano, aplicado al uso de los combustibles fósiles, nos ha permitido ocupar el planeta y llenarlo con nuestros residuos. Pero cada vez tendremos que ser más conscientes una realidad: estamos llegando de forma natural al punto en que el mantenimiento de nuestras poblaciones, de nuestra infraestructura energética y de nuestro planeta sufrirá rendimientos decrecientes. Debemos continuar innovando en nuestros sistemas energéticos y de producción de alimentos, pero también tendremos que ser humildes respecto a lo que esperamos conseguir. Si imaginamos la sostenibilidad como un taburete de tres patas —igualdad, economía y medio ambiente—, puede que el futuro pueda sostenerse sobre él, pero quizá tengamos que pensar en acortar la pata o las patas más largas, además de alargar las más cortas. IyC

© American Scientist Magazine

PARA SABER MÁS

Energy intensity ratios as net energy measures of United States energy production and expenditures. C. W. King en *Environmental Research Letters*, vol. 5, pág. 044006, 2010.

Renewable electricity futures study. Dirigido por M. M. Hand, et al. Laboratorio Nacional de Energía Renovable, 2012.

El capital en el siglo XXI. T. Piketty. Fondo de Cultura Económica de España, 2014.

Long-run demand for energy services: Income and price elasticities over two hundred years. R. Fouquet en *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 8, págs. 186-207, 2014.

Comparing world economic and net energy metrics, partes I, II y III. C. W. King, J. P. Maxwell y A. Donovan en *Energies*, vol. 8, n.º 11, págs. 12.949-13.020, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Economía biofísica. Jesús Ramos Martín en *IyC*, junio de 2012.

El lento ascenso de las renovables. Vaclav Smil en *IyC*, marzo de 2014.

NUEVOS PACKS TEMÁTICOS

Minicolecciones de monografías
sobre temas científicos clave

GRANDES CIENTÍFICOS



- Newton
- Darwin
- Galileo y su legado
- Lavoisier

ENFERMEDADES INFECCIOSAS



- Epidemias
- Virus y bacterias
- El sida
- Resistencia antibiótica (SOLO DIGITAL)

COMPORTAMIENTO ANIMAL



- La conducta de los primates
- Instinto sexual
- Inteligencia animal

EL CEREBRO



- El cerebro, hoy
- El cerebro
- Las neuronas
- Neuroglia

Descubre estos y muchos otros packs temáticos en

www.investigacionyciencia.es/catalogo

Teléfono: 934 143 344 | administracion@investigacionyciencia.es



Prensa Científica, S.A.

El arte de salvar reliquias de plástico



PATRIMONIO DETERIORADO: En el Museo Smithsoniano Nacional del Aire y del Espacio, en Washington D.C., las viseras de policarbonato de los trajes usados por los astronautas de las misiones Apolo están degradándose por la segregación de aditivos.



El plástico presente en los trajes espaciales del programa Apolo, en las pinturas de Andy Warhol y en otras piezas de museo está deshaciéndose. Los expertos investigan cómo rescatar estos tesoros

Sarah Everts

LOS TRAJES de aquellos hombres estaban concebidos para durar. Esas armaduras de ochenta kilos de peso, impolutamente blancas, confeccionadas a mano y con sus más de veinte capas de materiales de vanguardia, protegían a sus portadores de una falta de presión atmosférica que pondría la sangre a hervir y de temperaturas que fluctuaban entre los 180 grados Celsius bajo cero y los 150 sobre cero. Un día de julio de 1969, el mundo entero observó sin pestañear cómo, enfundado en uno de esos trajes, Neil Armstrong pisaba un suelo extraño y polvoriento.

De regreso a la Tierra, las indumentarias de la misión Apolo hallaron nueva vida como piezas de museo. Desde entonces han atraído a millones de visitantes al Museo Smithsoniano Nacional del Aire y del Espacio, en la ciudad de Washington. Sin embargo, el personal de esta institución ha descubierto con sorpresa que los trajes también necesitan su propio soporte vital.

El año pasado, Lisa Young, conservadora del museo, advirtió que comenzaba a extenderse un velo blanquecino por los transparentes cascos, que recuerdan a peceras: su superficie lisa y curvada empezaba además a agrietarse. «Resulta muy frustrante», admite Young. «Pensábamos que eran bastante estables.» No obstante, ya se habían producido señales que avisaban de problemas en los trajes. Las ampollas a presión de neopreno, que evitaban que los cuerpos de los astronautas reventasen en el vacío del espacio, empezaron a desmenuzarse y a liberar gases ácidos hace años. «Cualquiera que haya trabajado con los trajes espaciales conoce su olor», comenta Young. «Lo describiría como un olor dulzón a cloro, ligeramente acre.» Además, en el tejido blanco exterior apareció una mancha pegajosa de un color entre pardo y anaranjado.

El problema reside en el material de construcción: el plástico. Muchos piensan que los plásticos duran para siempre, lo cual los convierte en una plaga para el medio. Sin embargo, aunque las unidades repetidas de carbono, oxígeno, hidrogeno y otros elementos que componen los plásticos tienen un tiempo de vida largo, las cadenas que forman (los polímeros sintéticos) no envejecen bien. La luz, el oxígeno y la temperatura debilitan los enlaces que mantienen unida la estructura molecular. Como consecuencia, las sustancias químicas añadidas a los plásticos para dotarlos de flexibilidad o para colorearlos migran hacia el exterior, y la superficie se vuelve pegajosa y húmeda, perfecta para atraer la suciedad. Young cree que la visera de policarbonato del traje espacial estaba segregando una sustancia que se le añadió para facilitar el moldeo de la pieza.

También están en grave peligro varias obras de arte inestimables de siglo XX. Andy Warhol, David Hockney y Mark Rothko utilizaron en sus creaciones pintura acrílica, un polímero que se popularizó en los años cuarenta como alternativa a los óleos tradicionales. El plástico constituye un elemento básico de buena parte de nuestro patrimonio cultural reciente: importantes muebles de diseño, películas de archivo, maniquíes para pruebas de choque, las primeras piezas de Lego, joyas de baquelita, las esculturas de plástico del movimiento *pop-art*... «Ahora sabemos que los objetos de plástico figuran entre los más vulnerables de las colecciones de museos y galerías», explica Yvonne Shashoua, científica del Museo Nacional de Dinamarca experta en conservación y una de las primeras investigadoras del patrimonio cultural que ha estudiado la degradación de los plásticos.

Los conservadores ya han identificado los plásticos más propensos a sufrir problemas. Se están desarrollando nuevas herramientas para diagnosticar su degradación antes de que sea visible para el ojo humano (por ejemplo, midiendo las moléculas que se desprenden) y se están barajando nuevas estrategias para rejuvenecer preciadas obras de arte fabricadas con este material. Para ello se emplean todo tipo de medios, desde microemulsiones, un tipo de soluciones limpiadoras, hasta microfibras de poliéster que eliminan delicadamente la suciedad.


Sarah Everts es corresponsal en Berlín de la revista *Chemical & Engineering News*. Escribe con regularidad sobre ciencia y conservación de arte.

LA ETAPA DE LA NEGACIÓN

Entender que los plásticos eran un problema llevó su tiempo. Durante la mayor parte del siglo XX, el mundo museístico se vio afectado por un «síndrome de la negación» del deterioro del plástico, afirma Shashoua. «Nadie creía que los objetos de plástico de sus colecciones se iban a degradar.» Durante su apogeo en los años cincuenta, sesenta y setenta, algunos conservadores estaban tan entusiasmados con el plástico que hasta ellos mismos emplearon polímeros de manera poco aconsejable. Por ejemplo, para preservar el manuscrito más antiguo de Bélgica, el *Codex Eyckensis*, que data del siglo VIII, lo cubrieron con láminas de policloruro de vinilo (PVC). Décadas más tarde, hubo que despegarlas laboriosamente del pergamino, ya que los cambios en el polímero empezaban a agravar el deterioro del histórico documento.

Los maniquíes para pruebas de choque fueron los primeros que llevaron a Shashoua a pensar que los plásticos no durarían para siempre. La experta se había criado visitando el Museo de Ciencias de Londres, donde se exponían maniquíes fabricados en los años setenta para entender mejor las heridas y las muertes provocadas por los accidentes de tráfico. Estos cuerpos de mentira —entre los primeros de su tipo— constaban de un esqueleto de metal envuelto en gelatina médica, esculpida con forma humana y recubierta después con una capa de PVC. En las pruebas de impacto, los cuerpos de gelatina sangraban una pintura roja encapsulada, la cual quedaba retenida bajo la capa de PVC allí donde el muñeco se hubiera golpeado contra la estructura del automóvil. Esas «heridas» rojas indicaban las zonas más vulnerables del cuerpo.

Con el paso de los años, esos mismos maniquíes de prueba empezaron a sangrar de nuevo en el museo. A Shashoua le asombró ver que el PVC que recubría aquellos artefactos estaba resquebrajándose y chorreaba un residuo tan húmedo y pegajoso que el personal del museo tuvo que colocar placas de Petri en el expositor para recogerlo. Cuando en 2011 se le encargó a Shashoua su limpieza, se percató de que los contornos esculpidos de los muñecos perdían definición al desbaratarse el PVC; en algunas partes, la pintura roja se mezclaba con el plástico dañado, lo cual confería al mejunje que goteaba de los muñecos un tinte entre pardo y rojizo sobrecogedoramente realista.

Esta papilla goteante debe su origen —como todos los tipos de degradación de plásticos— al oxígeno. Por efecto de la luz y el

EN SÍNTESIS

Buena parte de nuestro patrimonio cultural moderno, desde pinturas acrílicas hasta piezas de Lego y trajes espaciales, está fabricado con plástico.

Estos polímeros no duran para siempre. Al degradarse, generan fragmentos moleculares desordenados. Esa inestabilidad puede arruinar pinturas y otros objetos.

Los conservadores disponen de nuevos métodos para identificar señales tempranas de descomposición y para limpiar las obras de arte deterioradas con métodos adaptados a cada sustancia química.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DEL MUSEO SMITHSONIANO NACIONAL DEL AIRE Y DEL ESPACIO



CUADRO SUCIO: Andy Warhol empleó pintura acrílica, una sustancia con base de polímero, en el retrato de Brooke Hayward (*izquierda*). Para garantizar que la superficie de la obra no sufriera daños durante la limpieza, el museo utilizó un microscopio de fuerzas atómicas portátil (*derecha*).

CORTESÍA DE TATE, 2007; © 2008 ANDY WARHOL FOUNDATION FOR THE VISUAL ARTS, ARTISTS RIGHTS SOCIETY (ARS), NUEVA YORK, Y DACS, LONDRES

calor, este arranca los electrones de las largas cadenas de polímero que se entrelazan para formar un objeto sólido. La pérdida de electrones puede debilitar y romper los enlaces químicos de un plástico, lo que mina su estructura. En esencia, las cadenas largas se dividen en monómeros, moléculas constituyentes de menor tamaño. En el caso de los maniquíes para ensayos de choques, esa desestabilización permitió que se derramaran los plastificantes, cierta clase de ingredientes que se incorporan a la fórmula del material para aumentar su flexibilidad.

Cuando el mundo museístico se rindió a la evidencia de que los plásticos no eran eternos, quienes tenían la tarea de preservarlos tuvieron que comenzar desde cero para entender por qué se descomponían sus colecciones, explica Matija Strlič, científica especializada en conservación del Colegio Universitario de Londres. Aunque existía una amplia bibliografía sobre la producción de polímeros, Strlič apunta que las investigaciones se interrumpían al final del tiempo de vida útil estimado de los objetos: justo cuando empiezan a interesar a los conservadores. Probablemente, los fabricantes supusieron que, una vez agotada su vida útil, los plásticos acabarían en la basura, no en un museo.

LOS TEMIDOS CUATRO

Los conservadores descubrieron que había cuatro tipos de polímeros plásticos especialmente propensos a dar problemas: el PVC, que se encuentra en todas partes, desde los tubos del sistema de soporte vital de los trajes espaciales hasta los maniquíes para pruebas de choque; el poliuretano, un ingrediente primario de productos tan diversos como los pantis y la gomaespuma para embalajes, así como de las esculturas hechas con ese material; y, por último, el nitrato y el acetato de celulosa, dos de los primeros polímeros sintéticos que se produjeron a escala industrial y que pueden encontrarse en las películas que se usaban en la fotografía y el cine antiguos, además de en artículos de carey artificial, como las boquillas para cigarrillos y los peines *vintage*.

El nitrato y el acetato de celulosa no solo son frágiles. A menudo los conservadores se refieren a ellos con el apelativo de «malignos», comenta Shashoua, pues propagan la destrucción a los objetos cercanos. Al desmoronarse sus polímeros, liberan ácido nítrico y ácido acético en estado gaseoso. (El ácido acético es lo que da al vinagre su olor característico y lo que hace que una película, cuando se degrada, huela a aliño de ensalada.) Los ácidos devoran los objetos fabricados con estos plásticos. Para empeorar las cosas, sus gases también pueden corroer metales y prendas textiles que compartan el mismo expositor o que estén almacenadas cerca. Ese olor a vinagre no solo es una señal de alarma que avisa de que estos objetos están autodestruyéndose, sino también de que la degradación del polímero se está llevando por delante a sus vecinos.

Shashoua ha visto vitrinas con artículos de la industria de la moda en las que los ácidos procedentes de la degradación de un peine de plástico han empezado a comerse las prendas textiles expuestas junto a él, o en las que el plástico de las monturas de imitación a carey libera ácido que corroe las bisagras metálicas de las gafas. En su propio lugar de trabajo, una caja que contenía cuchillos con mangos de nitrato de celulosa empezó a desprender ácido nítrico que atacó las láminas metálicas y las bisagras de un armario que se encontraba cerca de donde estaban guardados los cuchillos. A fin de detener estos ataques químicos, los conservadores pueden optar por guardar los objetos fabricados con acetato de celulosa en espacios bien ventilados para que las sustancias peligrosas se vayan. Otra posibilidad consiste en retener los gases nocivos en los diminutos poros de los filtros de carbón activado y zeolita, de modo muy parecido a como las máscaras de gas protegen a los soldados expuestos a armas químicas.

La ventilación y la adsorción son buenas estrategias contra el acetato y el nitrato de celulosa, pero no funcionan con todos los plásticos, explica Shashoua. Un ejemplo es el PVC: cuando los productos de su degradación se retiran del entorno inmediato, el material simplemente libera más. De ahí que, para frenar su degeneración, haya que guardarlo en contenedores sellados herméticamente. Cuando se observó que aparecían manchas en la capa exterior de nailon de los trajes espaciales de la misión Apolo, antes de un blanco impecable, los conservadores se dieron cuenta de que la causa se hallaba en los plastificantes que vertían los tubos del sistema de soporte vital, fabricados con PVC y cosidos al tejido. Por esos tubos, dispuestos alrededor de todo el traje, circulaba agua fría para evitar que el cuerpo de los astronautas se recalentase. «Tuvimos que quitar con cuidado los tubos del sistema soporte vital de todos los trajes Apolo y guardarlos por separado en contenedores sellados», recuerda Young. «Nos dio mucho trabajo.»

La necesidad de emplear contenedores sellados en un caso y ventilados en otro pone de manifiesto que no existe una solución universal, ya que, como apunta Strlič, no hay dos objetos iguales. Por esa razón, los especialistas tratan primero de identificar cuál es el polímero base de una pieza, para lo cual suelen

emplear equipos como espectrómetros infrarrojos por transformada de Fourier, capaces de revelar la huella molecular de un objeto haciendo reflejar en él luz de longitud de onda larga. Los conservadores del Museo Solomon R. Guggenheim de Nueva York emplearon este método para descubrir un peligro oculto en algunas obras del pionero de la Bauhaus László Moholy-Nagy. Se creía que su cuadro *Tp2* estaba pintado sobre baquelita (una resina de fenol-formaldehído), explica Carol Stringari, directora de conservación y restauración del museo. Sin embargo, un análisis con espectrometría de infrarrojos llevado a cabo por científicos del Instituto de Arte de Chicago reveló que el polímero era, en realidad, nitrato de celulosa, uno de los plásticos que pueden liberar ácidos gaseosos nocivos.

Aunque la espectrometría aplicada de este modo resulta útil, tiene también sus límites. Permite identificar numerosos ingredientes, pero no siempre muestra el cóctel entero de pigmentos, estabilizadores, tensoactivos, plastificantes y antioxidantes que se mezclan en el plástico. A menudo, los fabricantes mantienen en secreto las recetas como parte de su propiedad intelectual. Dado que no es fácil encontrar referencias de las sustancias incluidas, se requieren arduos análisis para determinar la composición química del plástico.

Esos aditivos cambian la manera en que un objeto envejece y se deshace. Algunos tipos de PVC, como el empleado en el sistema de soporte vital de los trajes espaciales, liberan al descomponerse un plastificante pegajoso llamado di(2-etilhexil)ftalato. Otros objetos de PVC desarrollan una corteza blanca pulverulenta en la superficie; en este caso, el responsable es el ácido esteárico, un lubricante que se añade al plástico para impedir que el polímero se pegue al molde durante la fabricación.





LAVADO CON AGUA: La pintura acrílica *Andrómeda* (*abajo*), de colores oscuros, contenía aditivos que, con el tiempo, crearon una capa de color claro. Los conservadores (*arriba*) variaron los niveles de iones y sales del agua empleada para decapar los productos químicos descoloridos y dejar así intacta la pintura oscura.

CORTESÍA DE TATE, 2008; © ALEXANDER LIBERMAN TRUST

EL OLOR DE LA DESCOMPOSICIÓN

Identificar la mezcolanza química de los artefactos de plástico antes de desarrollar una estrategia que alargue su vida es tan importante que los investigadores husmean —literalmente— sus ingredientes. En un proyecto que lleva el apropiado nombre de «Olores del patrimonio», Katherine Curran, del Colegio Universitario de Londres, sacó partido del hecho de que una buena cantidad de plásticos en proceso de degradación emiten moléculas olorosas. No solo el acetato de celulosa huele a vinagre y el neopreno viejo a cloro dulce cuando se descomponen, sino que muchos otros plásticos también liberan moléculas volátiles: cuando se degrada, el PVC desprende un aroma a coche nuevo y el poliuretano puede oler a mermelada de frambuesa, a canela o a caucho quemado. Y estos tan solo son los olores que detecta la nariz humana. Curran desarrolló una técnica de espectrometría de masas que analiza todas las moléculas volátiles que se desprenden de un objeto para establecer con precisión qué aditivos y estabilizadores contiene su plástico. El objetivo consiste en determinar qué está ocurriendo en el interior sin necesidad de aplicar técnicas invasivas, y en hacerlo antes de que aparezcan signos visibles de deterioro, explica la investigadora.

Curran llevó su técnica al Museo y Galería de Arte de Birmingham, donde tomó muestras del aire alrededor de una enorme instalación artística de 2005, obra del artista de Benín Romuald Hazoumé, llamada *ARTicle 14, Débrouille-Toi, Toi-Même!* («ARTículo 14, ¡arréglatelas solo!»). La instalación muestra un carrito de supermercado cargado hasta los topes de zapatillas deportivas, ordenadores, un rollo de película, palos de golf, teléfonos Nokia antiguos, juguetes, cazuelas, sartenes, zapatos de tacón rosas y una aspiradora, por nombrar solo unos pocos elementos, que Hazoumé creó con objetos que había acumulado durante los años noventa del siglo xx y los primeros años del xxi. En medio de la caótica obra de arte, Curran y sus colaboradores detectaron la presencia de ácido acético, uno de los gases corrosivos que pueden dañar los materiales próximos. «Descubrimos que el ácido procedía del rollo de película, concretamente del poliéster que se estaba degradando», explica Curran. Los responsables del museo están ahora planteándose si deberían almacenar el rollo de película por separado, o usar adsorbentes para el ácido a fin de evitar que ejerza un efecto perjudicial sobre otros componentes de la pieza.

Curran también ha probado su «canario de mina» en el Museo de Londres con una colección de bolsos *vintage* (de imitación de cuero, carey sintético o cables espirales para auriculares de teléfono del siglo xx). En el caso del bolso de cable de auricular blanco, Curran «olió» la presencia de plastificantes que normalmente proceden de la degradación del PVC: una útil señal de alarma para la plantilla del museo, que ahora quizá quiera guardar el bolso en un contenedor sellado.

Los investigadores también están recurriendo a técnicas de visualización para trazar mapas bidimensionales detallados, prácticamente píxel a píxel, de la composición química de un objeto. Por ejemplo, Strlič ha combinado la espectroscopía del infrarrojo cercano con una cámara digital para producir mapas bidimensionales coloreados, que permiten a los conservadores identificar la composición molecular de artefactos que contienen muchos tipos de plástico, así como observar la migración de los productos químicos generados por la degradación. Strlič ha examinado el interior de una popular pieza *vintage* de los

años cincuenta, apodada «dama del miriñaque» y en la que un busto de mujer hace de mango de un cepillo de pelo. La técnica le permitió descubrir que el mango era de acetato de celulosa y el cepillo, de nailon, ya que los gradientes de color mostraban la localización de ambos plásticos en el artefacto. La identificación de peligros potenciales, como el del acetato, brinda al personal del museo la posibilidad de tomar medidas antes de que el deterioro salte a la vista.

Aunque los investigadores están avanzando a la hora de diagnosticar cómo se degradan las obras de arte o los artefactos de plástico, aún intentan determinar cuál es la mejor manera de detener la descomposición y reparar el daño. Ese era uno de los retos que abordó el proyecto POPART (acrónimo en inglés de Preservación de Artefactos de Plástico en Colecciones de Museos), iniciado en 2008 y en el que participan diversas instituciones de todo el mundo. La limpieza puede que consiga adecentar el aspecto de un objeto, pero también es posible que acelere su deterioro general. Una costra blanca en la superficie resultará antiestética, pero también actúa como pátina protectora, de forma parecida a la capa de óxido de color verde que se forma sobre el cobre envejecido y que es tanto un producto de la degradación como una película protectora.

LA LIMPIEZA

Pero incluso si el lavado es la estrategia apropiada, los investigadores de POPART buscan métodos que permitan llevarla a cabo con seguridad. Los conservadores y restauradores son muy cautos, y los plásticos pueden agrietarse, disolverse o decolorarse cuando se exponen al agente limpiador equivocado. POPART investigó técnicas que abarcan desde microfibras de alta tecnología y ultrasonidos hasta microemulsiones limpiadoras cuidadosamente formuladas (soluciones de agua, aceites y un tensoactivo que atrapa la suciedad) e incluso geles. Los científicos aprendieron que limpiar un objeto de poliestireno con acetona (usada con frecuencia en quitaesmaltes de uñas) podía volver opaco un material de polímero transparente y, al final, disolverlo. Sin embargo, el isopropanol, un disolvente limpiador basado en alcohol, resulta seguro para la mayoría de los plásticos.

El uso de algo tan sencillo como el agua para limpiar pinturas acrílicas es arriesgado, según explica Bronwyn Ormsby, científica especializada en conservación de la Tate, asociación de cuatro museos ingleses. Ormsby se enfrentó al problema en una pintura titulada *Andrómeda*, de 1962, la pieza acrílica más antigua de la colección. El artista ruso-americano Alexander Liberman pintó esta obra geométrica abstracta sobre un lienzo circular, en el que cuatro colores sólidos (negro, lila, morado oscuro y verde) evocan la oscuridad del espacio exterior. Sin embargo, las pinturas acrílicas contienen ciertos tensoactivos que ayudan a que los pigmentos se mantengan en suspensión en el tubo, en lugar de decantar en el fondo. Eso es bueno para el pintor, pero, en un lienzo seco, dichos compuestos migran a la superficie y crean una sustancia pegajosa que atrae la suciedad. En 2007, *Andrómeda* estaba cubierta por tanto tensoactivo que tenía un recubrimiento blanquecino, el cual distrae en pinturas de colores oscuros, señala Ormsby. La experta explica que en condiciones normales habría empleado agua para limpiarla, ya que suele eliminar la suciedad mejor que cualquier otro disolvente. Pero también hincha los polímeros acrílicos, lo que puede conducir a una pérdida de pintura durante el lavado.

Sin embargo, es posible alterar las características del agua para volverla más segura. Un grupo de investigadores dirigido por Richard Wolbers, de la Universidad de Delaware, ha hallado que, si el *p*H del agua se mantiene en torno a un valor de 6 y se añade al líquido algo de sal, el grado de hinchamiento del polímero se ve limitado. Ormsby empleó este método sobre la obra de Liberman, que hoy ya luce tan oscura y solitaria como hace cincuenta años. Los investigadores de la Tate también han utilizado un microscopio de fuerzas atómicas para monitorizar la limpieza del retrato acrílico de Brooke Hayward, de Andy Warhol, y garantizar que solo se eliminaba la suciedad y se respetaba la pintura.

ARTE SOSTENIBLE

Ormsby y otros están trabajando también con científicos de Dow Chemical, a fin de que los recursos a escala industrial de la compañía les permitan realizar rápidamente un elevado número de reacciones químicas y poder estudiar diversas microemulsiones sobre muestras de pintura acrílica.

Los investigadores del plástico están entablando contacto con artistas para informarles sobre los riesgos potenciales de producir arte con plástico. «La idea no es interferir en el proceso creativo, sino dar la opción a los artistas de usar esta información si así lo desean», aclara Carolien Coon, que además de científica de conservación en el Instituto de Patrimonio Sostenible del Colegio Universitario de Londres, también es artista. Coon admite que se pregunta cómo estará una escultura que vendió hace años, la cual contiene goma de silicona, una pieza de bronce, una pecera y aceite para bebés. «No tengo la menor idea de qué aspecto tendrá hoy. Espero que no haya goteado por toda la mesa del comedor.»

La gran esperanza de los científicos dedicados a la conservación es que restaurar el pasado les ayude a prepararse para el futuro, cuando los materiales plásticos de hoy en día (como las impresiones 3D) pasen a integrarse en las colecciones de los museos. Uno de esos artículos podría ser la primera guitarra acústica impresa o un traje de la Estación Espacial Internacional que ya no esté en uso. Tarde o temprano, dejarán atrás su época de esplendor y los conservadores querrán tener a mano herramientas para darles a estos iconos culturales un lavado de cara. IyC

PARA SABER MÁS

The science of saving art: Can microbes protect masterpieces? Katherine Harmon en ScientificAmerican.com. Publicado en línea el 9 de febrero de 2009. Disponible en **www.scientificamerican.com/article/the-science-of-saving-art**

Plastic: Has the dream material of the 20th century become the nightmare of the 21st? Yvonne Shashoua en *Incredible Industry: Preserving Evidence of Industrial Society*. Dirigido por Morten Ryhl-Svendsen, Karen Borchersen y Winnie Odder. Proceedings of the Nordic Association of Conservators' 18th Conference, Dinamarca, 25-27 de mayo de 2009.

Assessment of the degradation of polyurethane foams after artificial and natural ageing by using pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry and headspace-solid phase microextraction-gas chromatography/mass spectrometry. A. Lattuati-Derieux en *Journal of Chromatography A*, vol. 1218, n.º 28, págs. 4498-4508, julio de 2011.

Thermal quasi-reflectography: A new imaging tool in art conservation. Claudia Daffara et al. en *Optics Express*, vol. 20, n.º 3, págs. 14.746-14.753, junio de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuevas herramientas químicas para crear plásticos. John A. Ewen en *IyC* julio de 1997.

Winfried Scharlau es catedrático emérito de matemáticas de la Universidad de Münster. En 2003 visitó a Grothendieck en Lasserre y mantuvo con él una larga conversación. En los años siguientes, ambos intercambiaron una extensa correspondencia.



MATEMÁTICAS

ALEXANDER GROTHENDIECK, de eminencia a eremita

Tras una infancia azarosa y pese a una formación académica deficiente, este gran matemático adquirió en poco tiempo fama mundial. A los 63 años, lo abandonó todo para vivir en soledad

Winfried Scharlau

DURANTE MÁS DE 20 AÑOS, apenas nadie conoció el paradero del hombre al que se le podría llamar, con cierta justicia, el mejor matemático del siglo xx. Alexander Grothendieck evitó desde 1991 casi cualquier contacto con otras personas. Solo se supo nuevamente de él a su muerte en el sur de Francia, el 13 de noviembre de 2014. Fue el final de una vida extraordinaria en todos los sentidos. Como escribió a un compañero del colegio el 29 de septiembre de 2006: «Contar lo que ha pasado en mi vida requeriría muchos libros, que aún no se han escrito».

No solo sus contribuciones a las matemáticas carecen de precedentes. Grothendieck rompió además con todas las normas de la sociedad burguesa. Fue siempre un solitario que parecía vivir en otro mundo. Su vida plantea muchos enigmas que se antojan irresolubles.

Ya sus principios fueron cualquier cosa menos burgueses. Su padre, Alexander Schapiro, un anarquista ruso judío nacido en 1890, se incorporó con 15 años a la lucha anarquista contra el régimen zarista. Detenido en 1907, fue condenado a muerte y durante una semana se le condujo cada día al paredón, pero dada su juventud la pena capital fue conmutada por la de cadena perpetua. Tras pasar diez años en prisiones y campos de concentración rusos, fue liberado durante la Revolución de Octubre y se sumó a los luchadores nacional-anarquistas del general ucraniano Néstor Majnó. De nuevo capturado, esta vez por el Ejército Rojo, y condenado a muerte, aprovechó el caos que siguió a la Primera Guerra Mundial para huir a Berlín, donde se ganó el sustento como fotógrafo callejero.

Allí conoció a la periodista, actriz y escritora Johanna (Hanka) Grothendieck, quien venía de una familia de Hamburgo bien situada. Su padre regentó durante los primeros años del siglo un hotel en Altona. Sin embargo, Hanka rompió en su juventud con el mundo burgués que le correspondía como

PETER BADGE/TYPOS 1 EN COOPERACIÓN CON HLF - TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS, 2016

EN SÍNTESIS

Alexander Grothendieck nació en Berlín el 28 de marzo de 1928, hijo del anarquista Alexander Schapiro y la periodista Hanka Grothendieck.

Tras una juventud llena de aventuras, con grandes lagunas en su educación formal y acosado por los nazis, se convirtió muy rápidamente en un matemático de primer orden mundial que reconstruyó la geometría algebraica sobre bases completamente nuevas.

En 1970 rompió con la vida que había llevado hasta entonces. Abandonó la investigación y se retiró al campo para fundar el movimiento ecologista «Sobrevivir».

Dos décadas después se apartó completamente del mundo en un pueblo de los Pirineos. Hasta su muerte, acaecida en noviembre de 2014, escribió un vasto texto, «Meditaciones», al que aún no se le ha dado forma editorial.



ALEXANDER GROTHENDIECK retratado pocos meses antes de su muerte, en 2014. El fotógrafo Peter Badge, quien por encargo de la Fundación Klaus Tschira visitó a todos los receptores vivos de la medalla Fields y de otros premios, fue uno de los pocos que tuvo la oportunidad de ver al matemático.

hija de un acomodado hotelero de Hamburgo y llevó una vida inestable y errante. Alexander Grothendieck, el hijo de ambos, nació el 28 de marzo de 1928.

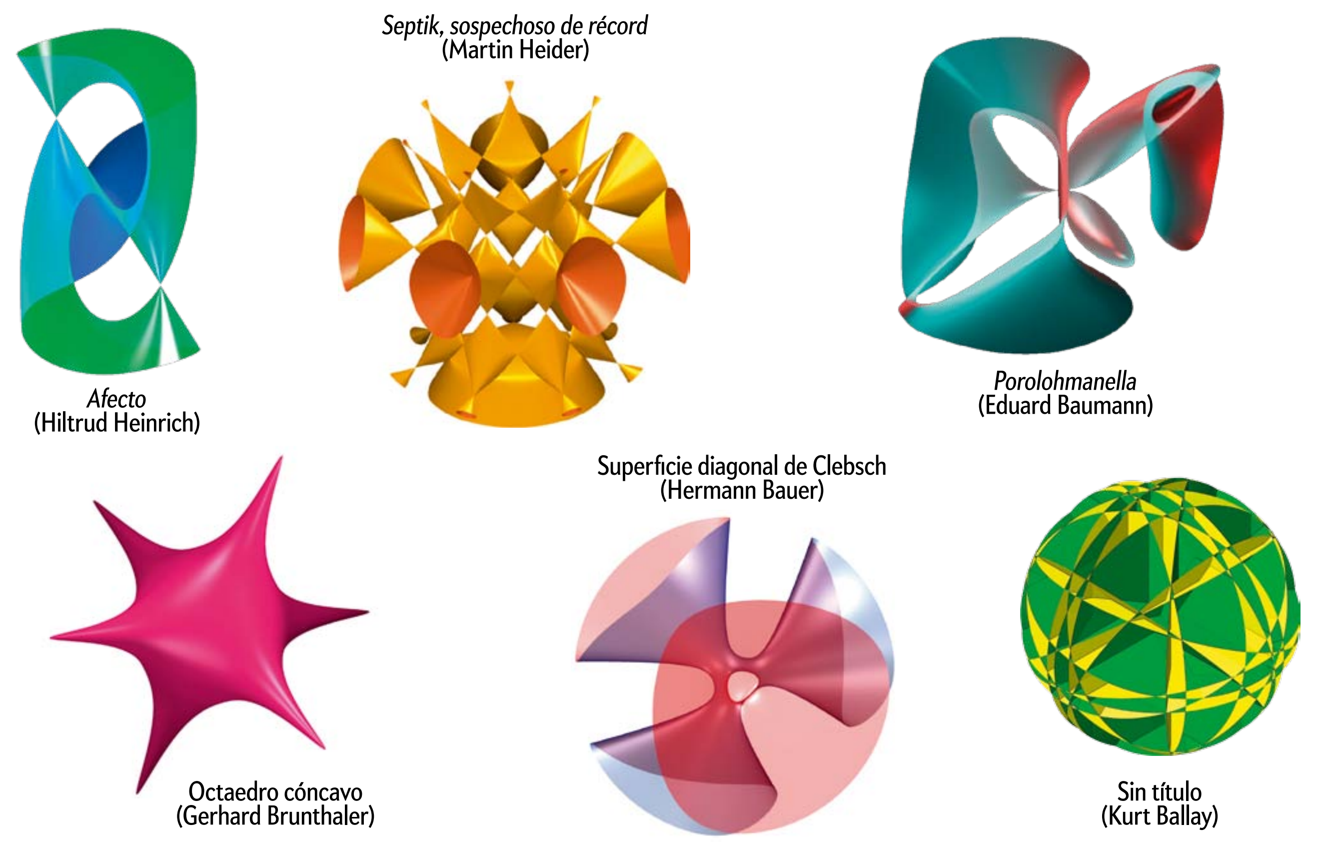
A la llegada de los nazis al poder, Schapiro emigró a Francia y después a España, donde luchó en la Guerra Civil. Tras volver a Francia, fue internado por su participación en la guerra de España hasta que, en agosto de 1942, las autoridades francesas lo entregaron a las alemanas. Deportado a Auschwitz, debió de ser enviado a las cámaras de gas nada más llegar. Hanka Grothendieck, que lo había acompañado en Francia y España, pasó la guerra en un campo de internamiento francés. Desde 1945 hasta su muerte, en 1957, vivió la mayor parte del tiempo con su hijo y asistió a su meteórico ascenso.

La infancia de Alexander transcurrió entre anarquistas, personas que habían optado por la marginalidad social, profetas itinerantes, emigrantes del este de Europa y vidas fallidas. Cuando sus padres se marcharon a Francia en 1933, lo dejaron bajo la custodia de la familia del reverendo Heydorn, en Hamburgo-Blankenese. Allí fue a la escuela y cursó el primer año de secundaria (*Gymnasium*). Aquellos fueron los únicos años en que tuvo una forma de vida ordenada.

Dada su condición de «medio judío», la situación pronto se hizo demasiado peligrosa para él, por lo que en 1939 los Heydorn lo mandaron a Francia, donde viviría con sus padres de nuevo. Al poco de estallar la Segunda Guerra Mundial, su madre y él fueron internados en un campo francés para «extranjeros indeseables». En 1942 tuvo la suerte de ponerse a salvo, junto con miles de refugiados más, en Le Chambon-sur-Lignon, una pequeña ciudad del Macizo Central donde el pastor protestante André Trocmé había fundado el Colegio Cévenol, un instituto basado en los principios de la no violencia y la solidaridad internacional. Grothendieck asistió a esa escuela hasta completar el bachillerato y, en 1945, empezó a estudiar matemáticas en la Universidad de Montpellier. Pudo permitírselo gracias al modesto apoyo económico de una organización de refugiados y a lo que le reportaban trabajos ocasionales, como el de vendimiador, entre otros.

Las matemáticas que se enseñaban en Montpellier estaban tan atrasadas que Grothendieck dependía en lo esencial de estudiar por su cuenta. En otoño de 1948 fue a París, donde conoció a los principales matemáticos franceses: desde veteranos como Henri Cartan, Jean Leray, Jean Dieudonné, Claude Chevalley o André Weil, hasta sus coetáneos Jean-Pierre Serre, Pierre Cartier o François Bruhat. En el renombrado seminario de Cartan y en reuniones similares se inició en la matemática moderna con una rapidez impensable para alguien con una formación tan deficiente. En otoño de 1949 se trasladó a Nancy para trabajar con Laurent Schwartz y Jean Dieudonné, dos matemáticos ya famosos por entonces. Empezó así un período de 21 años en los que se dedicó casi por completo a las matemáticas.

A este período pertenece una anécdota contada muy a menudo que, aunque quizá se exagere un poco, es básicamente cierta. Poco después de llegar a Nancy, Grothendieck pidió a Schwartz un tema para su tesis doctoral. Schwartz, que ya había ganado la medalla Fields (un premio que en matemáticas goza de tanto prestigio como el Nobel en otras disciplinas), le propuso abordar alguno de los 14 problemas aún no resueltos que se citaban en la conclusión de un artículo que había publicado hacía poco con Dieudonné. Podía echarle un vistazo y escoger



CORTESÍA DE LOS AUTORES DE LAS IMÁGENES/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

VARIEDADES ALGEBRAICAS: El trabajo de Alexander Grothendieck redefinió la geometría algebraica, el estudio de las formas geométricas cuyos puntos se corresponden con las soluciones de ecuaciones algebraicas, o polinómicas. Las reproducidas aquí constituyen una muestra de las miles remitidas a un concurso de *Spektrum der Wissenschaft,* la edición alemana de *Scientific American*.

el que quisiera. Ese estudiante completamente desconocido y de origen misterioso, del que solo se sabía con seguridad que su formación tenía demasiadas lagunas, regresó en unas semanas habiendo resuelto la mitad de los problemas. La otra mitad le ocupó unos pocos meses, durante los cuales no pidió ayuda a nadie. Desde ese momento, quedó claro que Grothendieck era un matemático fuera de lo normal.

Schwartz y Dieudonné dirigieron su atención al análisis funcional, una rama de las matemáticas basada en la idea de representar una función como un punto de un espacio de infinitas dimensiones. Cuando no se conoce la función que resuelve un problema (una ecuación diferencial, por ejemplo) o ni siquiera se sabe si existe, una posibilidad consiste en intentar encontrar una sucesión de funciones que vayan aproximándose cada vez más a la solución. Si dichas funciones fuesen puntos en un espacio de dimensión finita, como el espacio tridimensional al que estamos acostumbrados, se podría intentar que la sucesión de aproximaciones se configurase de modo que convergiera a un límite, que sería la solución del problema original. Sin embargo, el concepto de límite no puede generalizarse sin más al espacio de funciones.

Es característico que, ya desde el principio mismo de su carrera, Grothendieck aspirase a la mayor generalidad posible. En su tesis de 1953 introdujo un nuevo tipo de espacio funcional, los «espacios nucleares». Estos se distinguen por el hecho de que las sucesiones y sus límites se comportan esencialmente como en los espacios de dimensión finita.

Su condición de apátrida hacía que fuese difícil que consiguiera una plaza en Francia tras haberse doctorado. Gracias a la mediación de Schwartz encontró trabajo en Sao Paulo y posteriormente en Lawrence, en la Universidad de Kansas, donde se le ofrecieron excelentes condiciones para desarrollar su investigación.

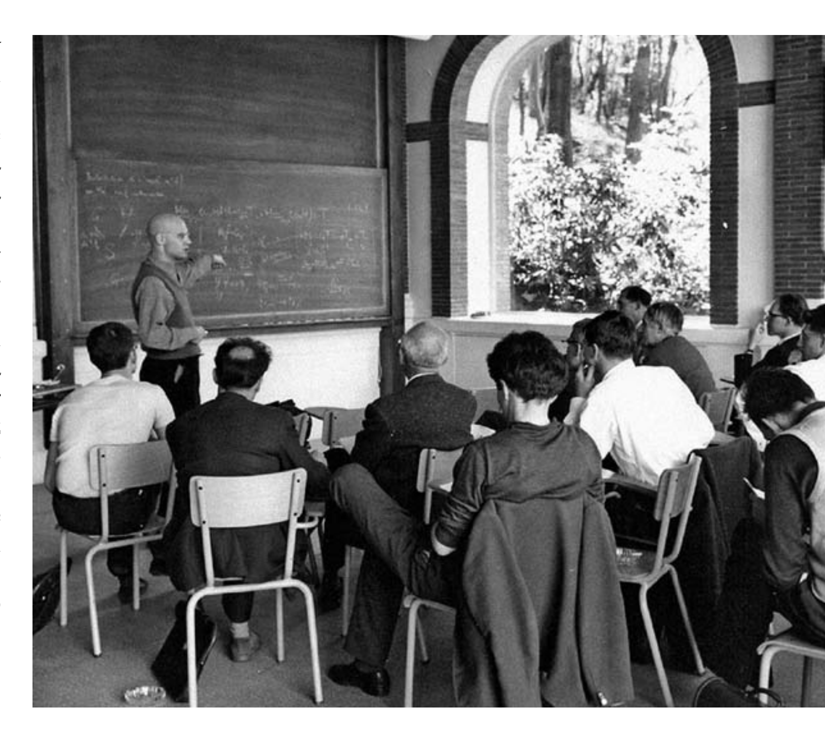
Sin embargo, más o menos hacia el final de 1954, abandonó brusca y radicalmente el análisis funcional para dedicarse a la geometría algebraica. Como era habitual en él y en su posterior modo de trabajar, no abordó inmediatamente problemas concretos de su nueva disciplina, sino que primero reformó desde sus raíces una teoría auxiliar, el álgebra homológica, y la reedificó.

NUEVOS FUNDAMENTOS DE LA GEOMETRÍA ALGEBRAICA

La geometría algebraica estudia las estructuras geométricas cuyos puntos satisfacen ecuaciones algebraicas (aquellas cuyas variables están relacionadas mediante adición, sustracción, o multiplicación). Las más simples de estas «variedades algebraicas» son curvas en el plano definidas por ecuaciones de dos variables. Así, el conjunto de puntos del plano (x, y) que satisfacen la ecuación $x^2 + y^2 - 1 = 0$ es una circunferencia de radio 1 centrada en el origen. Otros ejemplos son la parábola, definida por la ecuación $y - x^2 = 0$, y la hipérbola, por $xy - 1 = 0$.

En tres dimensiones, una variedad algebraica descrita por una ecuación es, en general, una superficie. Su representación gráfica se ha convertido en los últimos años en todo un deporte. Y aunque esas bellas imágenes no hayan originado grandes avances en la disciplina, sí dan una idea de la riqueza de formas que pueden emerger de una simple ecuación: de una extensión finita o infinita, con una o múltiples partes que se intersecan a sí mismas, con puntas como agujas o con agujeros como los de un toro o una rosquilla.

La geometría algebraica trata de poner orden en esta multiplicidad. Pero no lo hace mediante el análisis de propiedades expresables mediante longitudes y ángulos, sino cualitativamente. Por ejemplo, la circunferencia y la parábola constan de una sola pieza, mientras que la hipérbola consta de dos. La circunferencia es finita; la parábola y la hipérbola, infinitas. Un toro tiene un agujero, mientras que una esfera no tiene ninguno.



GROTHENDIECK en el Instituto de Estudios Científicos Superiores (IHES) de París, en los años sesenta.

CORTESÍA DE WINFRIED SCHARLAU

El teorema más simple y antiguo sobre las propiedades cualitativas de las superficies es el teorema de los poliedros de Euler. Los poliedros son estructuras espaciales limitadas por caras planas que forman entre sí aristas y vértices. Si V, A y C son, respectivamente, el número de vértices, aristas y caras de un poliedro, el teorema de Euler afirma que $V - A + C = 2 - 2g$, donde g es el número de agujeros del poliedro (su «género topológico»). El teorema puede reformularse de modo que valga para superficies curvas aunque carezcan de aristas o vértices, siempre y cuando sean compactas, es decir, si encierran completamente un volumen finito.

En el caso de superficies curvas, existe una proposición formalmente similar y de contenido estrechamente asociado al teorema de Euler, pero cuyo alcance es mucho más amplio. Se trata del teorema de Riemann-Roch, así llamado en honor a Bernhard Riemann y Gustav Roch, cuya demostración clásica se basa sobre todo en el análisis: las superficies algebraicas se describen mediante ecuaciones diferenciales, y la curvatura en cada punto se determina a partir de las derivadas de la función que define la superficie. En diciembre de 1953, Friedrich Hirzebruch extendió el teorema de Riemann-Roch a variedades de más dimensiones. Su sensacional demostración se basaba en los nuevos métodos analíticos y topológicos desarrollados por Cartan, Serre y René Thom.

En la primera mitad de 1957, Grothendieck superó ese logro al generalizar aún más el teorema. Este golpe de genio le puso súbitamente —al contrario que sus resultados previos en análisis funcional, también espectaculares— en el candelero de la comunidad matemática. A diferencia de la demostración de

Hirzebruch, la de Grothendieck es puramente algebraica y no necesita herramientas del análisis ni de la topología, lo que amplía drásticamente su campo de aplicación. Hasta entonces, las funciones algebraicas que definían una variedad valían para números reales o complejos. Grothendieck amplió su validez a cualquier cuerpo (estructuras en las que pueden realizarse las cuatro operaciones básicas que nos son familiares de la aritmética, incluida la división), un paso clave que permitiría posteriores usos en la teoría clásica de números. Además, Grothendieck no solo consideró una variedad, sino también aplicaciones, o «morfismos propios», entre variedades. En el caso particular de un morfismo que lleva toda una variedad a un solo punto, el enunciado de Grotendieck del teorema de Riemann-Roch equivale a la versión de Hirzebruch. Esto nos lleva a una consideración filosófica: para Grothendieck, lo que estaba en un primer plano no eran los objetos individuales, sino las relaciones (aplicaciones, morfismos, etcétera) entre objetos diferentes.

Lo mismo cabe decir de la entonces emergente teoría de categorías. Más abstracta todavía que la teoría de conjuntos, esta disciplina propone un marco formal para la construcción de las teorías matemáticas y plantea varias cuestiones fundamentales; en particular, la de qué objetos de una teoría presentan ciertas propiedades universales. Aunque la teoría de categorías no ha servido para resolver ningún problema fundamental, sí ha permitido poner orden en la geometría algebraica.

En 1958, el industrial francés Léon Motchane fundó en París el Instituto de Estudios Científicos Superiores (IHES), un instituto de investigación con pocos profesores permanentes y muchos profesores visitantes de todo el mundo. Dieudonné y Grothendieck fueron sus primeros profesores de matemáticas. En él, Grothendieck impartió un seminario de geometría algebraica en el que participaron destacados matemáticos como Michael Artin, Pierre Berthelot, Luc Illusie, Michel Demazure o Pierre Deligne, entre otros muchos. Allí se desarrollaría la nueva geometría algebraica.

PENSAR CON LA MÁQUINA DE ESCRIBIR

La manera de trabajar de Grothendieck fue, al menos a partir de los años sesenta, poco habitual pero muy eficiente. Él mismo decía que, para él, «pensar» significaba «escribir». En otro momento afirmó que, con la máquina de escribir, escribía justamente al ritmo en que pensaba. Durante muchos años se sentó cada día (o cada noche) durante más de doce horas frente a la máquina, desarrollando sus ideas y teorías de forma provisional e incompleta pero, aun así, muy precisa. Luego elaboraba esos textos o se los daba a los miembros del seminario para que lo hicieran ellos y les diesen una forma publicable y, a menudo, para que los completaran en largas discusiones con él. Así nacieron tanto un texto que se haría famoso, el *Seminario de geometría algebraica* (*Séminaire de géométrie algébrique*, SGA), como los *Elementos de geometría algebraica* (*Éléments de géométrie algébrique*, EGA), una obra fundamental de cuya redacción final se encargó su antiguo profesor, Dieudonné.

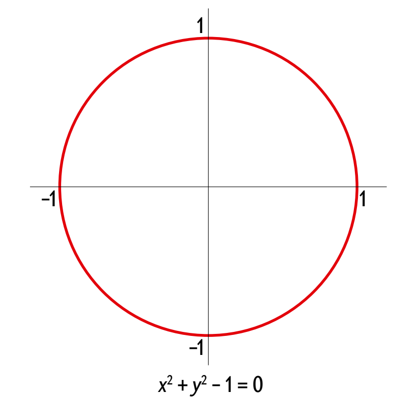
LA REFUNDACIÓN DE UNA DISCIPLINA

La geometría algebraica según Grothendieck

En su formulación clásica, la geometría algebraica tiene como objeto básico de estudio las variedades algebraicas: ciertas curvas, superficies y sus generalizaciones a más dimensiones. Grothendieck, en cambio, basó su teoría en un nuevo tipo de objeto, el *esquema*. Ello no solo permitió unificar la geometría algebraica clásica, sino hacer contacto con la teoría de números. Su construcción consta de tres pasos.

Una variedad algebraica se corresponde con el conjunto de soluciones de un polinomio, como $x^2 + y^2 - 1$ o $x^2 - y^2 - z$. En general, un polinomio es una función: uno de tres variables, por ejemplo, asigna un número a cada punto (x, y, z) del espacio euclídeo tridimensional. La variedad asociada a un polinomio viene dada por el conjunto de puntos en los que este toma el valor cero (*véanse las figuras*).

Los polinomios se pueden sumar, restar y multiplicar. El conjunto de los polinomios forma, por tanto, un *anillo*; es decir, una estructura en la que dichas operaciones están siempre bien definidas. El anillo de los polinomios es, además, conmutativo. Eso quiere decir que el producto de

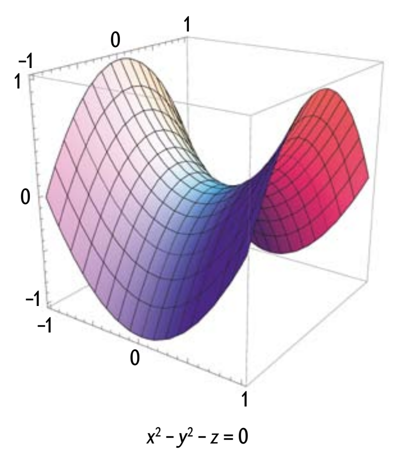


$x^2 + y^2 - 1 = 0$

dos elementos cualesquiera, f y g, satisface $fg = gf$.

El primer paso de la construcción de Grothendieck consiste en considerar un anillo conmutativo cualquiera. El ejemplo más sencillo de este tipo de estructura lo hallamos en los números enteros, $\mathbb{Z} = \{..., -2, -1, 0, 1, 2, ...\}$.

El segundo paso se basa en considerar los elementos de un anillo conmutativo como «funciones» (en un sentido muy general y que debe definirse con precisión). Su dominio de definición es el *espectro* del anillo, Spec(A), o el conjunto de sus *ideales primos*. En un anillo cualquiera, estos elementos desempeñan un papel muy similar al de los números primos en $\mathbb{Z}$. Para un anillo conmutativo A, su espectro ejerce un papel análogo al del espacio euclídeo, mientras que los elementos del anillo (concebidos como funciones) equivalen a los polinomios. Spec(A) y A forman una estructura denominada *esquema afín*.



$x^2 - y^2 - z = 0$

CHRISTOPH PÖPPE

Los *Elementos* constituyen una obra matemática muy atípica. Salvo que el lector sea un experto en geometría algebraica, no encontrará en ella ningún objeto matemático que le resulte familiar. No aparecen funciones matemáticas elementales, como la exponencial o la sinusoidal, ni una sola función del tipo de $f(x) = x^2$. Tampoco números como e, π, 0, 1 o 2, a los que tan acostumbrados estamos. No menciona el conjunto de los números enteros (ℤ), el de los racionales (ℚ) ni el de los complejos (ℂ), y tampoco incluye ninguna ecuación algebraica concreta ni puede encontrarse en él ejemplo alguno.

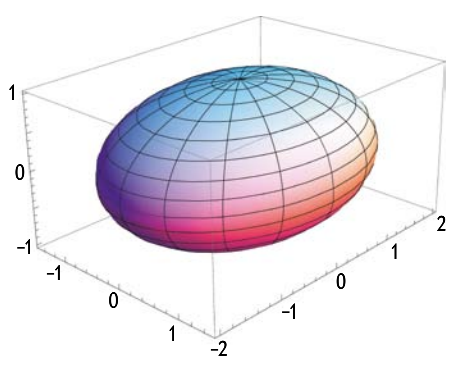
Así pues, ¿a qué resultados llega esa gran obra tan alejada de todos los objetos matemáticos corrientes? Los *Elementos* contienen principalmente dos tipos de proposiciones: que algo es representable finitamente, es decir, que se puede construir en un número finito de pasos a partir de un número finito de elementos básicos; y que un diagrama es conmutativo, es decir, que no importa el orden en que se introduzcan las aplicaciones, construcciones, morfismos, etcétera, que se estén considerando en la situación de que se trate.

Los objetos abstractos a los que se refieren sus teoremas pueden hacerse concretos, lo que permite llegar tras varios pasos a afirmaciones sobre las propiedades de un objeto geométrico determinado. Pero eso no serían más que ejemplos o casos particulares, y los ejemplos no le interesaban a Grothendieck, como él mismo no dejaba de señalar. Su objetivo era llegar a la esencia del problema liberándolo de cualquier accidente, aspecto secundario o suposición innecesaria, en busca siempre de la mayor generalidad posible. Tenía la convicción casi mística de que la solución a un problema se manifestaba por sí misma, mediante pasos pequeños, naturales, casi triviales, en cuanto se atinaba a reconocer y explicitar la naturaleza de lo que había que resolver.

Cuando queremos entender un principio, teoría o problema general, o hacérselo entender a otro, buscamos antes que nada un ejemplo concreto, instructivo y lo más sencillo posible. Ese no era en absoluto el caso de Grothendieck. En toda su obra sobre geometría algebraica no hay ni un solo ejemplo. Aunque seguramente no lo dijera nunca de forma explícita, creía que la consideración de ejemplos concretos impedía percibir la esencia de la cuestión. Puede que Grothendieck estuviera solo en su convencimiento, pero vale la pena reflexionar sobre si no habrá algo de cierto en esa forma de ver las cosas.

La historia de las matemáticas ofrece muchos ejemplos de la aparición de nuevas teorías. La topología algebraica y la lógica matemática, que se desarrollaron explosivamente en el siglo XX, son dos de ellos. En cambio, la geometría algebraica —incluida la «geometría aritmética», o la teoría de números— constituye una disciplina cuyas raíces se remontan a la Antigüedad. El trabajo de Grothendieck supuso un caso nada frecuente, único tal vez, de refundación de un área tan consolidada y que contaba con tantos resultados a sus espaldas.

Lo primero que se viene a la mente como analogía es la refundación del análisis que tuvo lugar en el siglo XIX. Matemáticos como Augustin-Louis Cauchy, Richard Dedekind y Karl Weiers-

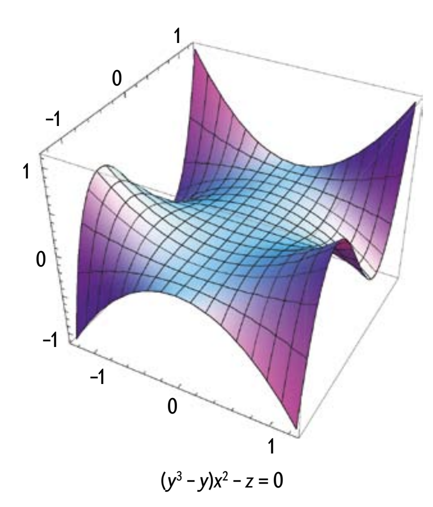


$(4/9)\,x^2 + (1/4)\,y^2 + z^2 - 1 = 0$

El tercer paso consiste en definir, a partir de estas estructuras, un *esquema*. El principio de construcción es similar al que se emplea con las variedades geométricas. Las distintas superficies del espacio tridimensional (planos, esferas, hiperboloides, etcétera) pueden mostrar formas globales muy distintas, pero, localmente (alrededor de un punto), todas ellas presentan el aspecto de un disco ligeramente deformado. Por tanto, es posible construir cualquier superficie «pegando» de la manera adecuada un número suficiente de discos. De igual modo, en el formalismo de Grothendieck, un esquema se construye encajando esquemas afines para formar un objeto global.

La construcción de Grothendieck se impuso rápidamente. Solo unos años después, en 1964 y 1965, su formalismo inspiraba las conferencias del futuro medallista Fields Heisuke Hironaka, al que el autor de este artículo visitó en la Universidad de Columbia.

Ya desde el siglo XIX era motivo de discusión en qué clase de anillos conmutativos debería basarse la teoría. La respuesta de Grothendieck fue tan simple como sorprendente: en todos. Ello permitía una construcción válida y carente de lagunas sin tener que dar rodeos o hacer construcciones *ad hoc*. Grothendieck se apuntó inmediatamente un primer logro: mientras que en la teoría clásica no estaba claro qué aplicaciones entre las distintas variedades debían considerarse, dicho problema desaparecía en la categoría de los esquemas.



$(y^3 - y)x^2 - z = 0$

La cuestión de las propiedades geométricas globales de las variedades algebraicas —la razón de ser de la geometría algebraica— se plantea también, en una forma modificada, para cualquier esquema. ¿Cómo proceder? Un recurso auxiliar lo proporciona la teoría cohomológica, de la que Grothendieck construyó diversas variantes. Esta fue fundamental para la demostración de las tres primeras conjeturas de Weil, por el propio Grothendieck, y de la última, por Deligne (para la primera ya había encontrado una demostración Bernard Dwork en 1960).

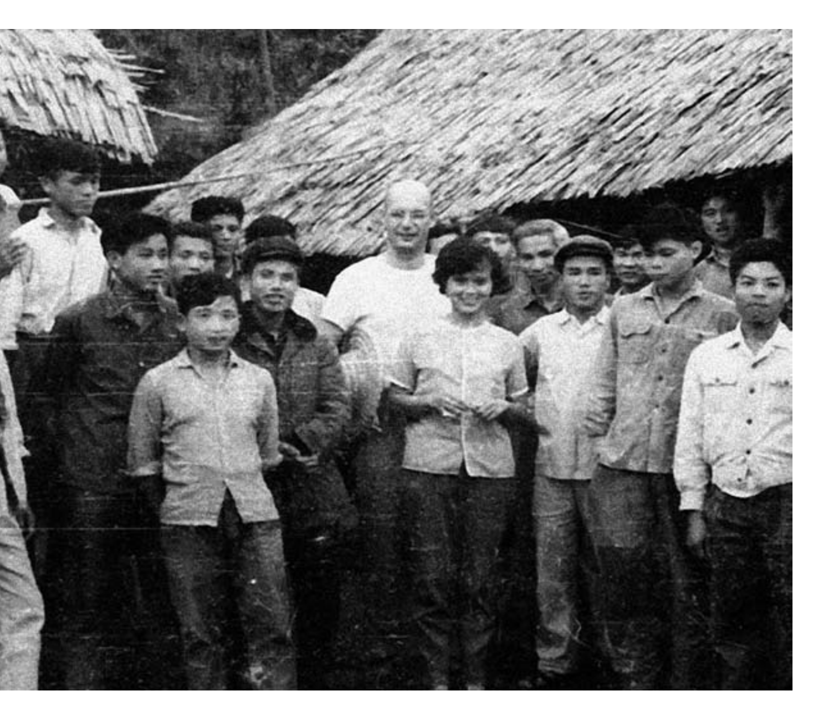
La búsqueda de la teoría cohomológica «correcta», que presente todas las propiedades deseadas, no ha terminado. La investigación actual se centra en el estudio de ciertos objetos denominados *motivos*.

trass sustituyeron los argumentos intuitivos de sus predecesores, para nosotros insuficientes, por las demostraciones modernas y rigurosas que empiezan a menudo con las palabras «sea $\varepsilon > 0$» y otras expresiones similares. Aportar esta precisión fue, sin duda, históricamente necesario y representó un gran avance, pero no condujo a nuevos resultados matemáticos, o lo hizo solo de forma muy indirecta. El caso de la geometría algebraica es distinto, porque algunos de los grandes logros matemáticos contemporáneos, como la demostración de la conjetura de Mordell por Gerd Faltings, la del último teorema de Fermat por Andrew Wiles, o la de la conjetura de Weil por Pierre Deligne, hubieran sido impensables —y entiéndase esta palabra al pie de la letra— sin la aportación de Grothendieck.

ABANDONO DE LA INVESTIGACIÓN

En 1970 Grothendieck dio un «gran vuelco» a su vida, como más adelante diría a menudo. Empezó con la renuncia a su posición en el IHES tras descubrir que estaba financiado en parte por el Ministerio de Defensa francés, algo incompatible con sus convicciones pacifistas y de izquierdas. Pero esta difícilmente puede ser toda la historia, aunque así la explicase él, ya que no solo abandonó su posición, sino también, y no mucho después, la investigación matemática. De tratarse solo de la financiación del instituto, hubiera podido encontrar trabajo en muchos otros lugares del mundo que no le plantearan conflictos morales.

También se separó de su mujer, Mireille Dufour, y de los tres hijos que tuvo con ella. Dejó la ciudad por el campo y se fijó objetivos completamente nuevos, aunque solo le durarían un tiempo. Tuvo numerosas relaciones de las que nacieron dos hijos más, pero los lazos con estos y con sus madres fueron deshaciéndose con el tiempo y al final apenas si los veía. La filosofía de vida que les transmitió concordaba con sus convicciones personales, pero de ningún modo con las normas de la sociedad burguesa.



EN NOVIEMBRE DE 1967, en plena guerra de Vietnam, Grothendieck impartió varias lecciones en Hanoi y luego, debido a los bombardeos, en el campo, a cien kilómetros de la capital.

CORTESÍA DE WINFRIED SCHARLAU

Bajo el influjo de la revolución estudiantil, los movimientos ambientalista y *hippie*, y las protestas por la guerra de Vietnam, Grothendieck fundó el colectivo «Sobrevivir» (*Survivre*), que abogaba por la conservación de la naturaleza, era contrario a toda forma de militarismo y defendía nuevas formas de vida. Durante más de dos años fue el incansable protagonista y principal financiador del grupo, al tiempo que ejercía como profesor visitante en el Colegio de Francia, en la Universidad de París Sur en Orsay, en la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo y en la Universidad de la Reina, en Canadá. Aunque no dedicaba a la investigación toda su atención, rendía más que un profesor corriente. En ocasiones hasta se ganó para «Sobrevivir» a algunos prominentes camaradas, pero el grupo no desarrolló una dinámica propia y se disolvió rápidamente cuando Grothendieck, decepcionado, lo dejó.

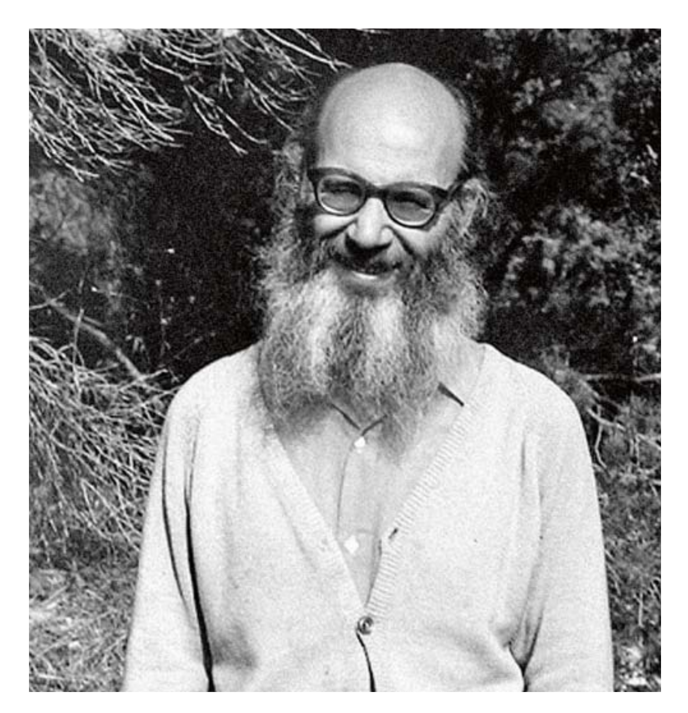
En 1973 abandonó la zona de París para ir viviendo sucesivamente en varios pequeños pueblos del sur de Francia. Apoyó de múltiples formas a un grupo de monjes budistas mendicantes que le impresionó profundamente, y se unió sin ataduras estrictas a varias comunas rurales y de gente que se apartaba de las formas ordinarias de vida. Sus miembros le recuerdan aún hoy como un hombre feliz y generoso, siempre dispuesto a ayudar, que traía vino y fruta a las comidas comunales y cantaba a menudo. Más tarde recordaría que vivió esa época como si fuera «un domingo».

En otoño de 1973, Grothendieck tomó posesión de una cátedra en Montpellier, que seguía siendo una universidad de provincias. Sin duda, en esa decisión influyó su intención de romper definitivamente con el mundo de la gran matemática, sito en París o Harvard. Dejó de publicar y de viajar con motivo de congresos o conferencias para llevar la vida normal de un profesor en una universidad poco importante. Durante el curso iba a la universidad una o dos veces por semana, y solo muy rara vez durante el resto del año. En una ocasión estuvieron a punto de expulsarlo del recinto universitario porque parecía un indigente, pero sus alumnos elogian aún hoy su compromiso personal.

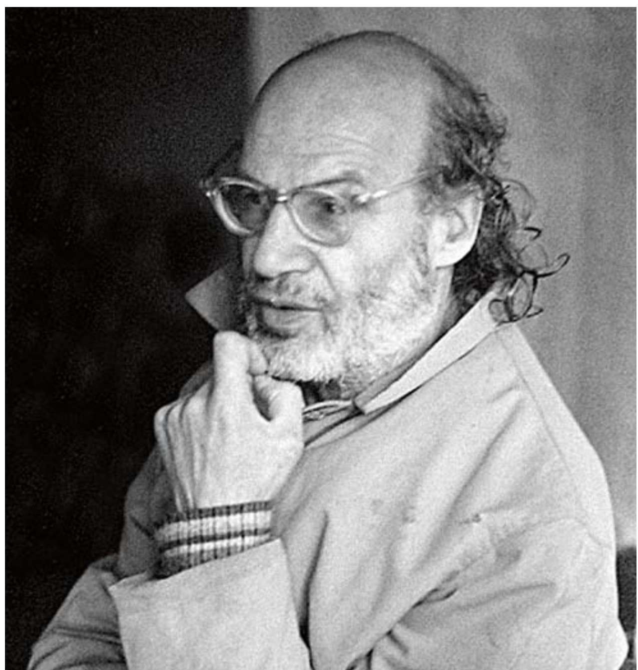
Grothendieck se decepcionó gradualmente ante la falta de interés de sus alumnos, que con frecuencia no querían aprender matemáticas, sino solo superar los exámenes. Solicitó un puesto en el Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS) francés y se lo concedieron, aunque tras algunas complicaciones: naturalmente, sus responsables le preguntaron por qué debían dar una plaza de investigador a alguien que había dicho explícitamente que no quería investigar y que consideraba que la investigación científica era perjudicial. Ocupó así un puesto como el que había tenido al principio de su carrera. En 1987, a la edad de 60 años, se jubiló.

Entre 1979 y 1990, y presumiblemente también después, escribió numerosas «meditaciones» matemáticas, autobiográficas y filosóficas. El más conocido de estos textos y, con cerca de 2000 páginas, el más largo, es el discutido *Récoltes et semailles* («Cosechas y semillas»): una obra llena de amargura, en cierta forma, un ajuste de cuentas con el mundo de las matemáticas, que ha generado reacciones encontradas. Muchos admiran su fuerza poética y ven en ella el testimonio de un espíritu único. A otros, en cambio, les parece repetitiva hasta el infinito, aburrida y por otra parte desagradable, por las muchas acusaciones claramente infundadas que en sus páginas profiere Grothendieck contra antiguos colegas y alumnos.

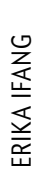
De esos textos matemáticos, el que ha tenido cierta influencia es «Esbozo de un programa», donde se propone una geometría no abeliana (es decir, no conmutativa). En cuanto al resto de las



EN 1979, Grothendieck pasó un año completamente solo en la casa de vacaciones de un antiguo camarada del movimiento «Sobrevivir», en La Gardette, cerca de Gordes (Provenza).



ESTA IMAGEN fue tomada en 1988, pocos años antes de que Grothendieck se retirara definitivamente de la luz pública.



meditaciones matemáticas, que tratan, entre otras cosas, de los fundamentos de la topología y de la teoría de las homotopías, quizá solo puedan valorarse en el futuro. El lector actual, conforme al presente estado de nuestros conocimientos, tiene la impresión de que divagan sin objeto, sin llegar nunca a ninguna parte.

Como muy tarde a finales de los años ochenta, ya no resultaba posible pasar por alto los síntomas de delirio religioso que mostraba Grothendieck. Pronosticó la llegada del Juicio Final el 14 de octubre de 1996, y dijo que Dios le había encargado que comunicara la noticia. Se identificaba con una monja estigmatizada y veía en su padre de acogida en Hamburgo una reencarnación de Jesús. La lista es fácil de alargar.

En agosto de 1991 desapareció de la luz pública. Tras un breve intermedio, compró una vieja casa de labradores en el pequeño pueblo de Lasserre, al sur de Toulouse, y partir de entonces mantuvo en secreto su paradero. Casi nunca recibía a quienes de todas formas se empeñaban en visitarlo, ni siquiera a sus hijos. Según contaba él mismo, se ocupaba de un trabajo filosófico sobre «la Creación». No hay duda de que en los últimos 23 años escribió miles de páginas, quizá decenas de miles, de sus «meditaciones». De vez en cuando se dirigía a un conocido de los viejos tiempos o incluso a la biblioteca del IHES porque deseaba algún libro.

Parece que, en todos esos años, solo abandonó su reclusión por unos días, y por un motivo tan absurdo como conmovedor. Creía que se había portado mal con un compañero de primaria y deseaba reparar el daño. Como no recordaba su nombre ni anunció su visita a ningún otro compañero de entonces, el viaje fue inútil. Tras vagar en taxi por los alrededores de Hamburgo, regresó con las manos vacías.

En 2009 estalló una nueva controversia. En una carta abierta, vetó la difusión de sus escritos y pidió que los retiraran de las bibliotecas. Se paralizaron los proyectos de reedición de sus libros y el de publicación de sus obras completas. Por mi parte, después de pensarlo mucho, llegué a la conclusión de que lo correcto era incumplir sus deseos. Consideré que merecía la pena recopilar, archivar profesionalmente y poner en condiciones su legado científico y no científico, en particular su extensa correspondencia.

Que Grothendieck sobreviviría al régimen nazi y la Segunda Guerra Mundial no habría podido darse por sentado. Que una persona con una educación secundaria y universitaria tan desordenada y con tantas lagunas se convirtiera en tan poco tiempo en uno de los principales matemáticos de su generación y que, principiante aún, consiguiera superar a los expertos más importantes del mundo en su propia especialidad es simplemente inexplicable. Tampoco hay precedentes de su súbita retirada de la ciencia para llevar una vida solitaria. Su importancia como científico hizo de él una persona que despertaba el interés público. Pero Grothendieck fue, ante todo, un hombre que se acercó como muy pocos a los límites intelectuales y existenciales, e incluso espirituales y morales, del ser humano.

Su trayectoria vital y su destino no le pertenecen solo a él, sino a la sociedad en general. Ese es el sino de las personas verdaderamente extraordinarias. IyC

© Spektrum der Wissenschaft

PARA SABER MÁS

Wer ist Alexander Grothendieck? Anarchie, Mathematik, Spiritualität, Einsamkeit. W. Scharlau. Parte 3: Spiritualität. Books on Demand, Norderstedt, 2010.

Wer ist Alexander Grothendieck? Anarchie, Mathematik, Spiritualität, Einsamkeit. W. Scharlau. Parte 1: Anarchie, tercera edición, corregida y aumentada. Books on Demand, Norderstedt, 2011. (Partes 2 y 4 en preparación).

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Materiales cerámicos

La producción casera de cerámica suele chocar con la dificultad de disponer de un horno donde cocer las piezas. Uno de los más sencillos puede construirse con un material sorprendente: papel de periódico

Hace algunos miles de años, uno de nuestros antepasados observó cómo el barro, después de permanecer un tiempo en el fuego, se transmutaba. De ser un material muy plástico estando húmedo, pasaba a permanecer impasible ante el agua y el fuego tras una larga cocción al rojo vivo. La cochura convierte el barro original en una cerámica y le confiere nuevas e interesantísimas propiedades. En la actualidad, el proceso sigue pareciendo mágico. Tanto es así que hoy nuestros escolares, muchos industriales, un buen número de artistas y algunos aficionados a la experimentación seguimos produciendo materiales cerámicos con ahínco.

Pero el proceso suele chocar con una dificultad: la cocción, la cual requiere temperaturas de centenares de grados. Muy a menudo, y especialmente en el ámbito escolar, las piezas quedan en crudo debido a la imposibilidad localizar o construir un horno adecuado. Por fortuna, el reto no es tan mayúsculo. A continuación describiremos el horno más sencillo imaginable, construido con papel y con un coste muy reducido, en el que podremos cocer tanto los productos de nuestra afición por la alfarería como materiales cerámicos de altas prestaciones para aplicaciones técnicas.

Comencemos por la materia prima. La pasta cerámica más básica es el barro común, o barro rojo. En principio, este debería ser un aluminosilicato resultante de la descomposición de otras rocas más primarias, aunque siempre incorporará minerales adicionales que condicionarán su color. Por ejemplo, el característico tono rojo ladrillo se debe a los omnipresentes óxidos de hierro, mientras que los colores más verdosos pueden tener su origen en el hierro reducido, el manganeso o la materia orgánica. Una buena forma de reconocer la arcilla es atacándola con ácido clorhídrico. La efervescencia deberá ser nula o, en caso de que la arcilla incorpore algo de cal, muy baja. Por el contrario, si la cal es muy abundante, el efecto del ácido será espectacular: un indicativo de que nos encontramos ante una arcilla de baja calidad.

Cabe preguntarse por qué la cal u otras impurezas rebajan la calidad del material. La respuesta es simple: cuanto más diversa sea la composición química de un material cerámico, menor será su resistencia al fuego. Expliquémonos mejor. Materiales cerámicos hay muchos: arcilla, gres, porcelana o alúmina, por citar solo algunos. Una característica clave de todos ellos es su resistencia al fuego, o su refractariedad. Para que un material sea refractario deberá tener un punto de fusión elevado; no obstante, este disminuirá en presencia de impurezas. Por ejemplo, existe un amplio catálogo de materiales cerámicos compuestos de cuarzo casi puro que resisten temperaturas muy superiores a los mil grados Celsius. Pero si al cuarzo le añadimos abundante carbonato de calcio, de sodio, de potasio o una mezcla de los tres, obtendremos un nuevo producto que fundirá a bastante menos de mil grados, dando lugar a una masa semitransparente a la que llamamos vidrio.

Volviendo a la arcilla, podremos adquirirla en un establecimiento sin ninguna dificultad. Sin embargo, resulta mucho más interesante localizarla en plena naturaleza. Por lo general no será necesario buscar mucho: se trata de un material muy abundante y fácilmente identificable en desmontes, taludes de la red viaria y cursos de agua.

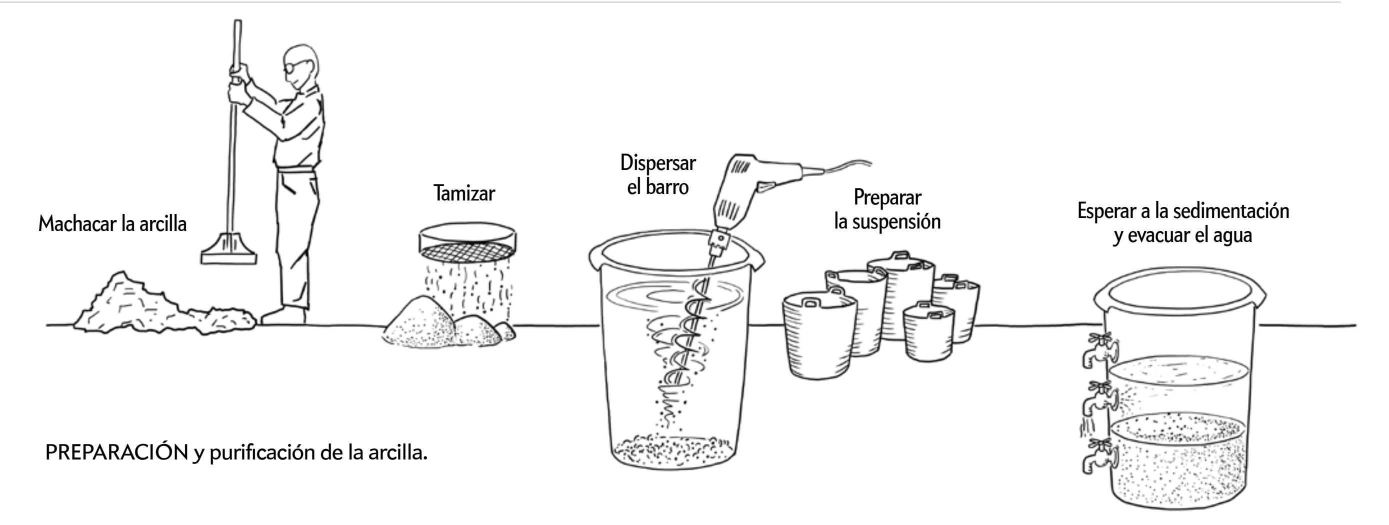
En ocasiones hallaremos arcillas casi puras, reconocibles a simple vista, pero en otras deberemos contentarnos con sedimentos de menor calidad. ¿Cómo evaluarla? Tomemos un terrón e hidratemos el material. Al rato debería quedarse pegado a los dedos y, si lo amasamos y lo comprimimos, deformarse plásticamente. De ocurrir así, tomemos una muestra y encerrémonos en el laboratorio para realizar un somero análisis.

En primer lugar habremos de observar qué porcentaje de arena y de materia orgánica contiene. Para ello, pongamos unas cucharadas soperas en un bote de cristal lleno de agua y agitemos hasta que todo quede en suspensión. Tras unas horas de reposo, el material habrá sedimentado por efecto de la gravedad, dejando en el fondo los áridos más gruesos, en la parte superior los más finos y, flotando en la superficie, la fracción orgánica. ¿Hay mucha arena? ¿El sedimento fino, una vez desecado, reacciona con el ácido clorhídrico? De ser negativa la respuesta a las dos preguntas anteriores, vale la pena invertir algo de esfuerzo y agenciarnos unos kilos del material. Para el proceso que describiremos a continuación, una buena cantidad podrían ser 30 o 40 kilos.

Una vez provistos de una cantidad suficiente, lo acondicionaremos para su uso. Si solo nos proponemos fabricar objetos básicos, como ladrillos o tejas artesanales, seremos poco exigentes. En cambio, si queremos disponer de una arcilla óptima para el torno, antes tendremos que purificarla (*véase el primer esquema*).

Primero, con un martillo o un pisón de hierro la machacaremos a fondo. Luego la tamizaremos ligeramente para eliminar las piedras y otros residuos mayores y, acto seguido, la introduciremos en un gran cubo lleno de agua; por ejemplo, un cubo de basura de 90 litros. Con ayuda de un taladro y de un agitador dispersaremos el barro, dejando que las piedrecillas más grandes vayan al fondo. Pasados unos minutos, trasvasaremos el líquido a otros recipientes menores para un segundo depurado de mayor calidad. Tras unas horas,

ESQUEMAS Y FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DEL AUTOR



PREPARACIÓN y purificación de la arcilla.

solo habrá en suspensión partículas muy finas: nuestro objetivo.

Para hacernos con ellas, verteremos de nuevo ese líquido a un gran cubo, donde concentraremos el resultado de varias operaciones. En este último, unos grifos laterales nos permitirán evacuar el agua limpia sin perturbar la lentísima sedimentación de la arcilla. Como es lógico, ajustando esos tiempos de sedimentación podremos regular la granulometría de nuestro material. Evacuada el agua y tras un cierto periodo de evaporación, que puede ser de unos días en verano o de semanas en invierno, el barro estará listo y habrá alcanzado la plasticidad adecuada. Un buen barro se reconoce con facilidad: se trata de una pasta fina, sin grumos, hechurable con las manos y muy plástica. Por una vez no hace falta correr. Hemos comprobado que, cuanto más tiempo permanece una arcilla a la intemperie o con el recipiente abierto y expuesta a una cierta humedad, más plástica se torna: un proceso conocido como maduración.

Se sabe también que la presencia de materia orgánica en el barro acelera el proceso, ya que nutre a la comunidad microbiana, la cual facilita la hidratación y reduce el tamaño de las partículas de arcilla. En este sentido, resulta interesante añadir al barro, una vez lavado, harina de maíz, en una proporción aproximada de una cucharada sopera por kilo de barro. Tras unas semanas de reposo, este adquirirá un olor nauseabundo, pero, para compensar, una plasticidad extraordinaria. Además, la harina desaparecerá durante la cocción y nos permitirá obtener un excelente material poroso, perfecto para tabiques semipermeables. En realidad, son muchos los aditivos que podemos incorporar. Harina, café molido, cenizas, carbón en polvo, virutas de madera e incluso bolitas de poliestireno expandido darán materiales porosos y ligeros, aptos para el aislamiento. En cambio, si añadimos arena gruesa, feldespato machacado o, mejor aún, porcelana triturada, aumentaremos la resistencia al fuego.

Lo anterior parece contradecir lo que señalábamos más arriba sobre el efecto fundente de las sales y los carbonatos. Pero hay una diferencia clave: antes nos referíamos a partículas finísimas de sustancias íntimamente mezcladas, y ahora hablamos de añadir materiales que funden poco y con granulometrías considerables, apreciables a simple vista, lo que se conoce como desgrasante o chamota si procede de materiales cerámicos triturados. Sus funciones son varias. En primer lugar, estos aditivos aumentan la plasticidad y reducen el volumen de agua necesaria para el amasado, lo que aminora la contracción durante el secado. Además, elevan la resistencia al choque térmico, pues absorben tensiones y dilataciones que, de otro modo, afectarían al material base. La cocción soldará estas partículas entre sí utilizando la arcilla como ligante: una especie de sinterizado facilitado por el efecto fundente de ambos materiales. Tras seguir los pasos que hemos descrito aquí, habremos conseguido una arcilla refractaria, algo de gran valor para construir elementos resistentes a altas temperaturas, como hornos, crisoles o cerámicas esmaltadas.

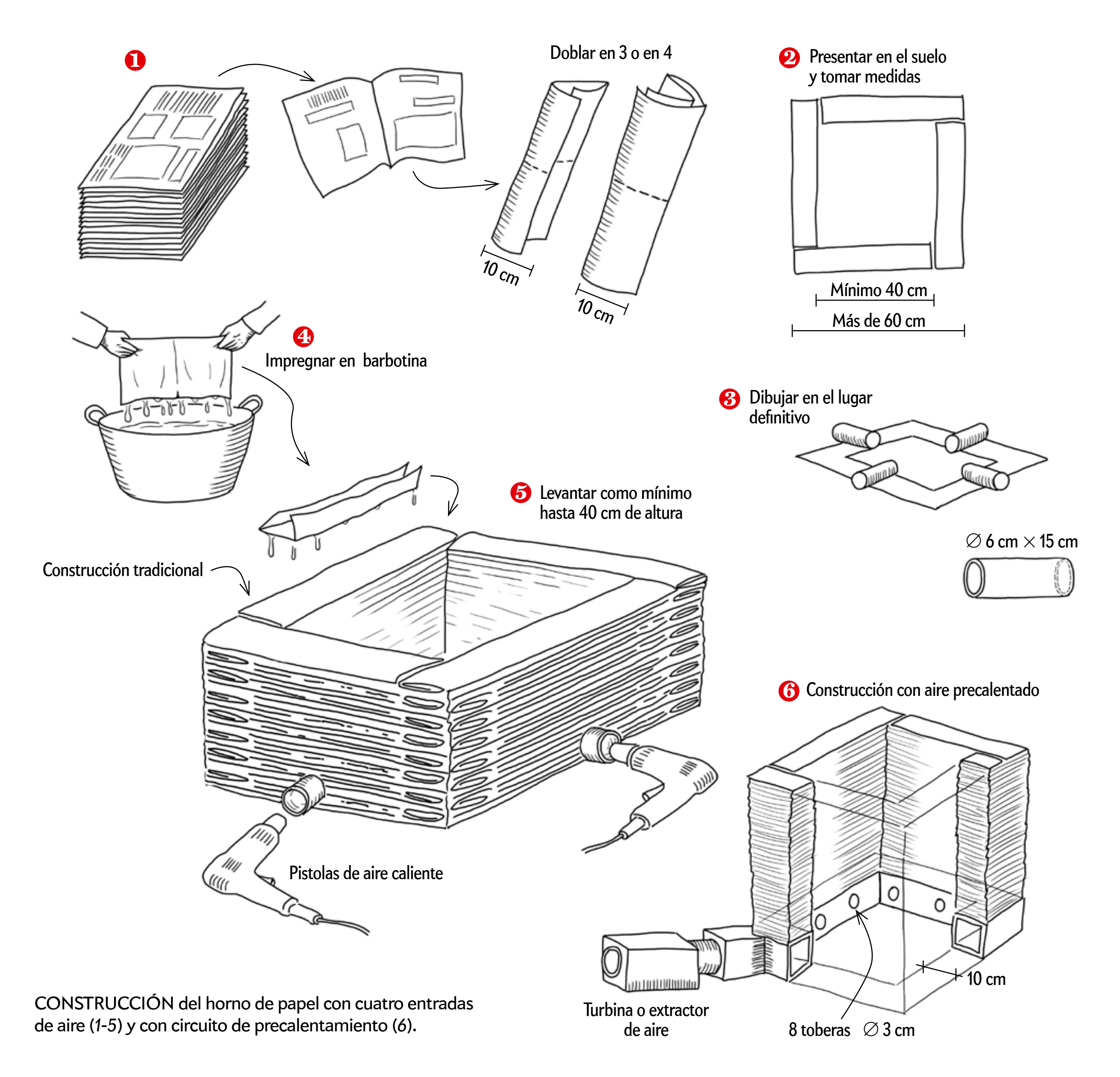
Sin duda, todo el proceso requiere cierta investigación por nuestra parte. En mi caso, preparo un surtido de piezas idénticas pero con distinta composición, las dejo secar lentamente e intento cocerlas en las mismas condiciones. Por último, evalúo su comportamiento y mejoro las recetas.

Llegados aquí habremos de construir el horno de cocción. Los diseños posibles son innumerables. Hay tantos hornos como ceramistas, y escoger uno en el que invertir nuestros esfuerzos resultará complicado. ¿Deberíamos decidirnos por uno eléctrico, de gas o de carbón? ¿Qué tamaño resultará óptimo? ¿Dónde obtener el material para construirlo? El investigador se enfrenta a menudo a todo tipo de dudas y a cierta preocupación por los costes que pueden acarrear algunas decisiones.

Por suerte, existe una solución: los hornos de papel que queman carbón vegetal. Puede parecer contradictorio, pero el papel de periódico, un material fácilmente combustible, permite fabricar un horno muy básico pero extraordinariamente práctico. Para ello, solo necesitaremos entre 5 y 7 kilos de papel, barro muy fino y algún dispositivo para inyectar aire a presión.

Fijémonos en el segundo esquema que reproducimos aquí. Nuestro objetivo consiste en construir un hogar cuadrado y tan grande como deseemos. Pero no fiemos nuestra suerte a un gran horno definitivo: es mejor comenzar con una versión de ensayo y hacer algunas pruebas.

Los diferentes periódicos tienen medidas distintas, por lo que antes de empezar convendrá elegir unos pocos formatos de dimensiones similares. Tomemos algunos pliegos enteros (es decir, de dos hojas) y doblémoslos a lo largo en forma de tríptico, de modo que la tira final tenga unos 10 centímetros de anchura ❶. Con cuatro de ellas dispuestas en el suelo, hagamos un cuadrado en el que las esquinas queden solapadas y tomemos medidas del resultado ❷. Para poder llevar a cabo una cocción de prueba, el espacio interior del horno deberá tener como mínimo unos 40 centímetros de lado. En cuanto al lugar de instalación, deberá tratarse de un sitio al aire libre y alejado de árboles o de cualquier otro elemento combustible. Siempre y cuando no sople un vendaval, un radio de seguridad de 8 o 10 metros será más que suficiente.



CONSTRUCCIÓN del horno de papel con cuatro entradas de aire (1-5) y con circuito de precalentamiento (6).

Ahora, en el lugar de instalación definitivo, marquemos en el suelo un cuadrado con las medidas que hemos determinado en el ensayo. Siguiendo los modelos más clásicos de hornos de papel, en el centro de cada lado colocaremos un retal de tubo metálico de unos 6 centímetros de diámetro y 15 de largo 3. Como explicaremos más abajo, esos serán los orificios por los que entrará el aire procedente de un ventilador.

A continuación deberemos levantar las paredes. Para ello, tomaremos unos cuatro o cinco pliegos de papel de periódico y los sumergiremos en una suspensión muy diluida de barro fino llamada barbotina. Esta sustancia, que será la que mantendrá el papel a salvo del calor del horno, puede hacerse añadiendo una buena cantidad de agua al mismo barro que hemos preparado (hasta que la mezcla adopte un aspecto similar al de pintura para paredes). Una vez tengamos los pliegos empapados en barbotina, los doblaremos para formar una larga tira 4. Solo queda disponerlas ordenadamente, como si de delgados ladrillos se tratara. Las colocaremos hilada sobre hilada, asegurándonos de que el conjunto mantenga una buena geometría, y levantaremos las paredes hasta que alcancen una altura similar al lado de la base 5. A medida que las paredes crecen, la barbotina rezumará y la extenderemos con las manos hasta formar una capa regular delgada. El recubrimiento de barbotina deberá impregnar por completo el interior y el exterior del horno, sin que queden parches desnudos (*véanse las fotografías*).

Con la barbotina aún bien húmeda, el horno ya está a punto. Solo queda lo más emocionante: encenderlo. Una vez más, el proceso es simple. Con el horno recién construido y chorreando barbotina, pondremos en la base de la cavidad ramas menudas y poco compactadas. Sobre ellas colocaremos trozos grandes de carbón vegetal, del que no importa mucho la calidad, pero sí que no contenga piedras ni tierra. Las temperaturas que conseguiremos serán tan elevadas que esas corrupciones del combustible se escorificarán, formando una masa más o menos vítrea que puede soldarse a las piezas de cerámica que con


HORNO recién terminado y listo para cocer.


HORNO encendido con carbón vegetal.

tanto esfuerzo hemos trabajado. Encima de los carbones colocaremos algunas de las piezas que deseamos cocer. Después, sobre ellas dispondremos otra capa de carbón grueso, otra de materiales cerámicos y así hasta llenar el horno, de modo que la última capa sea de carbón.

Después colocaremos brasas o pastillas de encendido en cada una de las cuatro aberturas de la base y acercaremos un poco los ventiladores. Lo más frecuente es utilizar secadores de pelo (cuatro secadores, uno para cada tubo), aunque también hay quien usa pistolas de aire caliente, con lo que la temperatura del interior excederá de largo los mil grados centígrados. En cualquier caso, el consumo eléctrico será importante o directamente intolerable. No obstante, hay una solución: aprovechar el calor generado por el propio horno.

En vez de disponer unos simples tubos para acoplar las pistolas de aire, podemos construir una base tubular de acero por la que circulará el aire procedente de una sola turbina 6. Cualquier soldador nos podrá construir una estructura cuadrada, en tubo de acero también cuadrado y de unos 10 centímetros de arista (es decir, del mismo ancho que las tiras de papel que hayamos empleado). Antes de soldar las cuatro partes, practicaremos en cada una de ellas dos agujeros de unos 3 centímetros de diámetro. Estos serán las toberas por las que el aire de la turbina pasará al interior del horno.

En una de las esquinas acoplaremos, también por soldadura, otro tubo cuadrado de unos 10 centímetros de largo, el cual acoplaremos al armazón cuadrado quitando toda la chapa intermedia que los separa. A este apéndice será muy fácil conectar la salida de aire de una turbina de extracción de humos, idéntica a la de muchas cocinas, pero de modo que opere como un ventilador que inyecte aire en el circuito. Con esta estructura para precalentar el aire, el encendido resultará más laborioso. Una buena estrategia consiste en colocar ante algunas de las toberas un tubo de cartón vertical por el que dejaremos caer unas brasas, para, acto seguido, activar la turbina.

En pocos minutos el interior del horno se pondrá al rojo vivo. En general, habremos de vigilar el ritmo al que aumenta la temperatura a fin de que las piezas no estallen como consecuencia del estrés térmico. Un simple cartón o una delgada chapa metálica servirán para estrangular la entrada de aire de la turbina, de forma que el caudal sea mínimo y la temperatura aumente poco a poco.

Sin un método para medir la temperatura del interior, deberemos estar atentos al color del fuego. Un rojo cereza oscuro permite cocer los materiales menos resistentes, como el barro común. En cambio, si nuestra pasta es más refractaria, podremos abrir el paso de aire y alcanzar un brillante color amarillo, indicativo de temperaturas muy superiores a los mil grados. En ese régimen quemaremos todo el carbón en poco más de una hora y veremos cómo la carga baja rápidamente. Cuando estimemos que todo el interior ha alcanzado una temperatura homogénea, habrá llegado el momento de aportar una carga más de carbón y reducir el flujo de aire, de forma que la temperatura baje suavemente durante un tiempo largo.

Dos o tres horas más tarde, todo el combustible se habrá agotado y podremos parar la ventilación y esperar a que el conjunto se haya enfriado hasta una temperatura razonable. No nos precipitemos en extraer la cerámica cocida, ya que podría rajarse debido al contraste de temperaturas. En cualquier caso, al poco tendremos en las manos el producto de nuestros esfuerzos.

Observemos las piezas. Lo primero que veremos es que algunas han cobrado un espectacular color rojo, mientras que otras, con la misma composición, han quedado más o menos negras. Ello se debe a que en algunas zonas del horno hay un exceso de oxígeno, por lo que se dan condiciones oxidantes. En otras partes, especialmente las más alejadas de las toberas, el oxígeno escasea y abunda el monóxido de carbono, lo que propicia una atmósfera reductora en la que los óxidos metálicos pierden el oxígeno y se reducen a metal, lo que oscurece la arcilla.

Curiosamente, los hornos de papel suelen resistir a la perfección estas condiciones infernales. La impregnación en barbotina húmeda garantiza la estabilidad estructural, aunque, eso sí, descubriremos que al mínimo roce se desintegra. En tal caso, podremos repararla para volver a usar el horno: con una brocha, aplicaremos una nueva capa de barbotina muy líquida y, acto seguido, taparemos el horno con un plástico a fin de que conserve la humedad hasta su nuevo uso. Gracias a ello, mi primer horno de papel soportó tres ciclos, a pesar de que los dos últimos fueron especialmente agresivos, ya que tuvieron como objeto ensayar materiales muy refractarios.

Para el tecnólogo aficionado, el horno de papel permite cocer fácilmente pastas realizadas con grafito, alúmina, corindón o carburo de silicio, las cuales pueden destinarse posteriormente a la construcción de hornos metalúrgicos o materiales de laboratorio. Ello nos abre la posibilidad de practicar la química a temperaturas elevadas, amén de dar rienda suelta a la creatividad artística que todos llevamos dentro.

por Alejandro Pérez Carballo



Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.

Juegos infinitos

Una sencilla generalización de la teoría de juegos que permite hacer contacto con algunos de los principales problemas abiertos en teoría de conjuntos

Imagine que se encuentra frente a un tablero de ajedrez, al otro lado del cual se sienta un gran maestro. Le permiten escoger blancas o negras y le aseguran que, en caso de tablas, usted será declarado ganador. ¿Cómo proceder?

Imagino que dependerá de lo bien que juegue. Pero, si su nivel es similar al mío —bastante bajo, le confieso—, reconocerá de inmediato que no importará qué color elija. Juegue con blancas o negras, lo más probable es que pierda la partida.

Sin embargo, no tendría por qué suceder así. Sabemos que, ya sea para las blancas o para las negras, existe una estrategia ganadora: una manera de jugar que garantiza la victoria sin importar qué haga el oponente (recuerde que hemos estipulado que, en caso de tablas, usted será declarado vencedor). Por desgracia —o por suerte, al menos para quienes disfrutan con el ajedrez—, nadie conoce dicha estrategia. Peor aún: ni siquiera sabemos si puede ejecutarse con las blancas o con las negras.

Por supuesto, el ajedrez no es el único juego con esta propiedad. En cada juego con dos participantes en el que no haya azar, en el que ambos jugadores tengan acceso a la historia completa del juego antes de su turno, y en el que el número de jugadas sea finito, uno de los dos contrincantes tiene una estrategia ganadora. (En caso de que las reglas iniciales permitan un empate, añadiremos la cláusula de que quien empiece será declarado ganador.) Ahora bien, ¿qué sucede si consideramos juegos infinitos; es decir, juegos con un número infinito de turnos?

Un caso sencillo

Para entender a qué nos referimos con un juego infinito, consideremos el siguiente caso. En primer lugar, fijemos un conjunto S de secuencias infinitas de ceros y unos; por ejemplo, el conjunto de todas las secuencias que contienen un número infinito de ceros. Dado S, podemos definir un juego $J(S)$ para dos jugadores, a quienes llamaremos Andrés y Bernardo, del modo siguiente. Por turnos, empezando con Andrés, cada uno de ellos escogerá 0 o 1. De esta manera, tras repetir el proceso infinitas veces, la «partida» habrá generado una secuencia infinita p de ceros y unos. Andrés ganará si consigue que la secuencia generada pertenezca a S; es decir, si $p \in S$. En caso contrario (si $p \notin S$), vencerá Bernardo.

Dado un juego $J(S)$ de este tipo, una estrategia para Andrés es una función que asigna 0 o 1 a cada secuencia finita de ceros y unos de longitud par (para incluir el primer turno de Andrés, determinaremos que la secuencia vacía es también una de longitud par). Por ejemplo, la función que asigna 0 a todas las secuencias finitas de longitud par constituye una estrategia para Andrés. En general, una estrategia para Andrés le dirá cómo jugar en su turno n-ésimo en función de lo que haya sucedido hasta entonces en el juego.

Decimos que una estrategia para Andrés es una estrategia ganadora en el juego $J(S)$ si, al seguirla, Andrés tiene garantizada la victoria haga lo que haga Bernardo. De igual modo, podemos definir una estrategia para Bernardo (una función que asigna un 0 o un 1 a cada secuencia finita de longitud impar), así como una estrategia ganadora para Bernardo.

Es fácil verificar que, para el juego que corresponde al conjunto de todas las secuencias que contienen un número infinito de ceros, la estrategia de Andrés consistente en elegir siempre 0 constituye un ejemplo de estrategia ganadora. Del mismo modo, en el juego asociado al conjunto de secuencias que contienen un número finito de ceros, Bernardo siempre podrá asegurarse la victoria (bastará



LA TEORÍA DE JUEGOS permite demostrar que en los juegos finitos con dos jugadores, como el ajedrez, siempre existe una estrategia ganadora. La generalización de este principio a juegos infinitos implicaría que un gran número de problemas abiertos en teoría de conjuntos podrían resolverse de manera natural.

© DOODLEMACHINE/ISTOCKPHOTO

con que se decida por la estrategia que dicta escoger 0 en todos los turnos). Y no es difícil ver que, si S es un conjunto de secuencias numerable, entonces siempre habrá una estrategia ganadora para Bernardo (¿puede ver por qué?).

Juegos abiertos y cerrados

Dado un conjunto S de secuencias infinitas, diremos que S es *abierto* si, para cada secuencia $s \in S$, existe un número natural m tal que, si s' es idéntica a s en sus primeros m elementos, entonces $s' \in S$. Un ejemplo de un conjunto abierto nos lo proporciona el conjunto S_1 formado por todas las secuencias que contienen más de k unos para un k dado. En general, si S es abierto, para verificar que una secuencia s pertenece a S, basta con mirar un segmento inicial finito de s.

Por otro lado, diremos que un conjunto S es *cerrado* si su complemento, S^c (el conjunto de secuencias que no están en S), es abierto. Por ejemplo, el conjunto de secuencias S_2 que contienen a lo sumo k unos constituye un conjunto cerrado (ya que su complemento es $S_2^c = S_1$). Además, podemos verificar que S_2 no es abierto, ya que cualquier segmento inicial de la secuencia cuyos primeros k miembros son iguales a 1 puede extenderse para obtener una secuencia que no está en S_2.

Sin embargo, en general no es cierto que un conjunto abierto no pueda ser al mismo tiempo uno cerrado. Por ejemplo, el conjunto S_3 de secuencias cuyo primer elemento es un cero constituye un conjunto abierto. Pero S_3^c, el conjunto de secuencias cuyo primer elemento no es un cero, es también un conjunto abierto. Por tanto, S_3 es a la vez abierto y cerrado.

Si S es abierto tendremos que, si Andrés ganó una partida de $J(S)$, habría sido posible parar después de un número finito de turnos y saber con certeza que Andrés sería el vencedor. Si S es cerrado, podemos decir lo mismo de Bernardo. De modo que, si S es abierto y cerrado, solo haría falta jugar un número finito de turnos para determinar quién será el ganador. Podemos pensar en los juegos finitos (como el ajedrez, las damas, etcétera) como en juegos infinitos abiertos y cerrados, en los que no importa qué suceda después de un número finito de jugadas.

Juegos determinados

Uno de los resultados principales de la teoría de juegos infinitos establece que, si S es un conjunto abierto o cerrado (o ambos a la vez), entonces el juego $J(S)$ está determinado: alguno de los dos jugadores tiene una estrategia ganadora para $J(S)$. (Nota para los entendidos: sabemos además que, si S es un conjunto de Borel, entonces $J(S)$ está determinado.) ¿Podemos generalizar este resultado a otros conjuntos de sucesiones?

En general, es posible demostrar que existen conjuntos S «extraños» para los cuales el juego $J(S)$ no está determinado. (A los lectores más duchos en teoría de conjuntos les interesará saber que este resultado se sigue del axioma de elección.) Pero supongamos que S es un conjunto que admite una definición en un lenguaje «razonable»; es decir, un conjunto cuya construcción podemos enunciar en un lenguaje preciso, como, por ejemplo, un lenguaje de segundo orden. ¿Podemos demostrar que $J(S)$ está determinado?

En un principio parecería que sí. Al afirmar que Andrés tiene una estrategia ganadora para $J(S)$ estamos diciendo lo siguiente: en el primer turno, Andrés puede escoger un número a_1 (bien 0, bien 1) tal que, para toda jugada b_1 de Bernardo, Andrés puede elegir en el segundo turno un número a_2 tal que, para toda jugada b_2 de Bernardo... etcétera, tal que la sucesión resultante está en S. En símbolos y restringiendo los cuantificadores al conjunto $\{0,1\}$:

$$\exists a_1 \forall b_1 \exists a_2 \forall b_2 \ldots : \langle a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots \rangle \in S \,.$$

Del mismo modo, decir que Bernardo tiene una estrategia ganadora puede escribirse como:

$$\forall a_1 \exists b_1 \forall a_2 \exists b_2 \ldots : \langle a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots \rangle \notin S \,.$$

Ahora bien, en general, dado un número finito m y un conjunto cualquiera X, la negación de:

$$\exists a_1 \forall b_1 \exists a_2 \forall b_2 \ldots \exists a_m \forall b_m : \\ \langle a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots, a_m, b_m \rangle \in X$$

es lógicamente equivalente a:

$$\forall a_1 \exists b_1 \forall a_2 \exists b_2 \ldots \forall a_m \exists b_m : \\ \langle a_1, b_1, a_2, b_2, \ldots, a_m, b_m \rangle \notin X \,.$$

Por tanto, parecería que, si generalizamos lo anterior a secuencias infinitas de cuantificadores, la negación de la primera expresión que escribíamos arriba debería ser equivalente a la segunda. Ello implicaría que, si Andrés no tiene una estrategia ganadora, entonces habrá una para Bernardo. En otras palabras, ello nos permitiría afirmar que, para todo conjunto «razonable» S de secuencias infinitas, el juego $J(S)$ está determinado.

Sin embargo, a partir de los axiomas usuales de la teoría de conjuntos, no es posible demostrar que para todo S «razonable» el juego $J(S)$ está determinado. Para llegar a tal resultado necesitaríamos asumir que existen ciertos conjuntos infinitos realmente enormes, llamados «cardinales grandes». Pero, en tal caso, numerosos problemas abiertos en teoría de conjuntos (problemas que no admiten solución a partir de los axiomas usuales) podrían resolverse. Es más, podrían resolverse de manera natural.

Por ejemplo, si asumimos que para todo S «razonable» el juego $J(S)$ está determinado, podríamos resolver el problema de saber si todo conjunto «razonable» (todo conjunto que se puede «construir» en un sentido preciso) es medible. Este problema entronca con varias de las patologías asociadas a los conjuntos no medibles que han aparecido en columnas anteriores [*véanse* «El teorema de Banach-Tarski», por A. Rayo, Investigación y Ciencia, diciembre de 2009; «Colecciones no medibles», por A. Rayo, Investigación y Ciencia, octubre de 2012; «Dardos y conjuntos infinitos», por A. Pérez Carballo, Investigación y Ciencia, abril de 2014; *y* «Bordes e idealizaciones», por A. Pérez Carballo, Investigación y Ciencia, agosto de 2015].

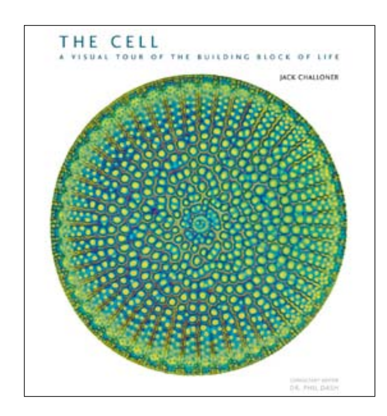
Uno de los programas de investigación más fascinantes en la teoría de conjuntos contemporánea gira en torno al estudio de las consecuencias de principios de este tipo: principios que, en esencia, afirman que existen conjuntos S con ciertas propiedades tales que el juego $J(S)$ está determinado. Resulta sorprendente que una generalización tan sencilla de la teoría de juegos implique consecuencias de semejante calado para el estudio de problemas muy abstractos en teoría de conjuntos. IyC

PARA SABER MÁS

Un análisis del papel que los juegos infinitos desempeñan en la teoría de conjuntos moderna puede encontrarse en el segundo capítulo de **Defending the axioms: On the philosophical foundations of set theory**, de Penelope Maddy (Oxford University Press, 2011).

EN NUESTRO ARCHIVO

Otra aplicación de las estrategias en juegos de este tipo puede encontrarse en **El problema de la inducción de Hume**, por Gabriel Uzquiano; *IyC*, noviembre de 2012.



THE CELL
A VISUAL TOUR OF THE BUILDING BLOCK OF LIFE

Jack Challonier
University of Chicago Press, 2015

Célula

Unidad básica de la vida

Los avances en técnicas de formación de imágenes registrados en los últimos quince años han revolucionado el campo de la biología celular. La microscopía de fluorescencia de superresolución nos permite observar la dinámica molecular y organular de la célula *in vivo* con una elevada resolución temporal y espacial. Gracias a la microscopía de fluorescencia sabemos que la actina propicia el desarrollo y la migración celular. Con esa herramienta, podemos abordar el estudio de los procesos con un detalle y una precisión sin precedentes. En el camino, este desarrollo ha dejado en evidencia el dogma de la biología molecular: que el ADN se transcribe en ARN que se traduce en proteína. De hecho, el conocimiento de la célula ha ido siempre de la mano de la técnica, de la microscopía, como recoge Challonier en este espléndido álbum de fotografías y diagramas espectaculares, con un texto nítido y completo y con recuadros que son compendios de la situación actual de nuestro conocimiento sobre la célula y su profunda transformación desde hace un par de décadas.

La teoría celular dotó de sentido al mundo de la vida, su desarrollo, reproducción y herencia. Pero la mayoría de las células son demasiado pequeñas para poder observarlas a simple vista; las más pequeñas, los micoplasmas, apenas miden una milésima de milímetro (una micra) de diámetro; la mayoría abarcan de 5 a 10 micras de diámetro. La microscopía óptica empezó en el siglo XVII con una sencilla disposición de lentes de aumento. El microscopista más influyente de ese momento fue Robert Hooke, encargado de realizar los experimentos en la Real Sociedad de Londres. En su *Micrographia*, publicada en 1665, aparecen dibujos puntillosos de estructuras hasta entonces desconocidas. Llamó «células» a unos espacios cerrados por paredes de células vacías, muertas. Con su microscopio de una sola lente, Antoni van Leeuwenhoek observó protozoos, algas unicelulares y bacterias.

En los años veinte del siglo XIX, Henri Dutrochet hirvió tejido vegetal en ácido nítrico para disolver el material que mantenía unida la célula: las células se separaban en numerosos glóbulos autocontenidos, idea confirmada en 1830 por Franz Meyer. En 1831, Robert Brown llamó «núcleo» a la mancha negra que aparecía en las células vegetales. Por su lado, Mathias Schleiden sugirió que los núcleos constituían la fuente de la que brotaban nuevas células. En 1839, Theodor Schwann establecía la primera teoría celular, basada en tres principios: toda parte de todo ser vivo consta de células, la vida de un organismo se debe a sus células vivas, y cada célula nace en otra célula. Este último principio quedó descartado muy pronto cuando se observó la fisión binaria o división en dos hijas.

Se disipó toda duda remanente sobre la presencia ineludible del núcleo cuando Joseph Jackson Lister introdujo, en esos años treinta del siglo XIX, lentes que corregían la aberración esférica (distorsión de la imagen) y la aberración cromática (enojosas líneas coloreadas en torno a la imagen). Cuarenta años más tarde, Ernst Abbe llevó el microscopio óptico hasta el límite de sus posibilidades sumergiendo lentes en aceite para maximizar aumentos, resolución, brillo y contraste. Entre uno y otro momento se registró un avance importante en la técnica de la tinción de los cortes histológicos: el uso de colorantes que eran absorbidos solo por determinadas estructuras de la célula, que de ese modo quedaban resaltadas. En 1858, Joseph von Gerlach advirtió que el pigmento carmín (cochinilla) era absorbido por el núcleo, pero no por el resto de la célula. La introducción de nuevos pigmentos sintéticos en el decenio siguiente expandió la técnica y propició el descubrimiento de otros orgánulos.

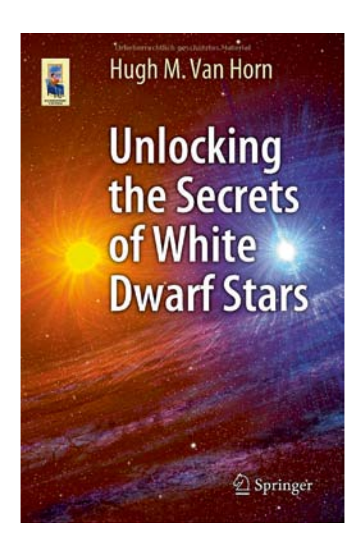
Así, Julius von Sachs descubrió los cloroplastos (una estructura esencial en la fotosíntesis) en esos años sesenta. En los noventa se identificaron las mitocondrias; el aparato de Golgi en 1897; en 1902, el retículo endoplasmático. Santiago Ramón y Cajal observó la delicada arborización de las dendritas. Pero ya en 1855, Rudolf Virchow realizó sus propias observaciones y publicó la teoría celular moderna *omnis cellula e cellula* (toda célula procede de otra célula).

Pese a la mejora de la técnica microscópica, ciertas características de la célula resultaban opacas a la observación óptica. En 1931, Ernst Ruska y Max Knoll inventaron un nuevo tipo de microscopio que empleaba electrones para producir imágenes. Muy pronto, la microscopía electrónica resolvía objetos de 10 nanómetros de diámetro; a mediados de los cuarenta se resolvían ya los de 2 nanómetros. Uno de los primeros triunfos del nuevo útil fue el descubrimiento de los ribosomas, las máquinas moleculares de síntesis de proteínas. En 1959, la microscopía electrónica reveló la ramificación de las espinas de las dendritas; Edward George Gray estableció que las conexiones entre neuronas (sinapsis) acontecían en esos sitios.

La teoría celular establece que todos los seres vivos constan de células, unidades básicas de la vida. Declara también que las células proceden de otras células. Distingue entre células procariotas (bacterias y arqueobacterias), que carecen de membrana nuclear, y células eucariotas, con núcleo y orgánulos encerrados dentro de membranas. Todas las especies del dominio de las eucariotas (protistas, hongos, plantas y animales) poseen células eucariotas. Los organismos complejos, como los humanos, poseen células especiales para funciones especiales, como el transporte de oxígeno por el cuerpo, la digestión de los alimentos o la síntesis de huesos. En sus 3500 millones de años de existencia sobre el planeta, la célula ha demostrado ser una central energética que ha difundido la vida primero en el mar y luego en tierra firme para desarrollar la rica y compleja diversidad biológica que contemplamos.

La técnica que sirvió para su gradual descubrimiento se encamina ahora hacia su manipulación y creación *ex novo*. Lógicamente, del futuro no hay fotografías. Ni apenas texto.

—Luis Alonso



UNLOCKING THE SECRETS OF WHITE DWARF STARS

Hugh Van Horn
Springer International Publishing, 2015

Estrellas enanas blancas

Punto de apoyo del progreso en cosmología

En 2011, Saul Perlmutter, Adam Riess y Brian P. Schmidt recibieron el premio Nobel de física por su demostración de la aceleración de la expansión del universo: contra todo pronóstico, pues los astrofísicos suponían que la expansión se deceleraría de forma paulatina [*véase* «El rompecabezas de la energía oscura», por Adam Riess y Mario Livio; Investigación y Ciencia, mayo de 2016]. Ese fue uno de los numerosos avances cosmológicos propiciados directa o indirectamente por el estudio de las estrellas enanas blancas.

Las estrellas con una masa inicial menor de diez masas solares, las cuales integran el 90 por ciento de todas las estrellas, van perdiendo masa en el curso de su evolución hasta terminar por convertirse en enanas blancas. De ese modo, ofrecen un registro fósil de la formación de estrellas en la galaxia. Las enanas blancas, cuya masa se equipara a la solar, aunque confinada en un volumen del tamaño de la Tierra, son, efectivamente, el punto final de la evolución de la mayoría de las estrellas. Se trata, pues, de remanentes de estrellas que han agotado su combustible nuclear. Con las enanas rojas, predominan en el universo. Se han descubierto miles de esos objetos de brillo débil. Poderosas herramientas para comprender el universo, constan principalmente de carbono y oxígeno. Sin embargo, sus núcleos estelares se encuentran demasiado fríos para soportar reacciones termonucleares.

Si la enana blanca es miembro de un sistema binario, puede acrecer, aumentar su masa con materia procedente de su compañera. A medida que la enana blanca gana masa y se aproxima al límite de Chandrasekhar, unas 1,4 masas solares, su radio decrece y se incrementa su densidad central. Los núcleos de carbono y oxígeno se ven obligados entonces a moverse cada vez más juntos. Llega un momento en que los núcleos se acercan tanto que se producen reacciones picnonucleares: se desarrollan reacciones del tipo $^{12}C + ^{12}C \rightarrow ^{24}Mg$, $^{12}C + ^{16}O \rightarrow ^{28}Si$ y $^{16}O + ^{16}O \rightarrow ^{32}S$, liberándose energía en el proceso. La emergencia de estas reacciones señala el principio del fin de una enana blanca.

La existencia de estas estrellas desconcertó en un comienzo a los astrónomos. Para levantar el velo de misterio que las celaba, hubo que esperar a avances revolucionarios en ciencia y técnica, incluidos el desarrollo de la física cuántica, la construcción y utilización de grandes telescopios, la invención del ordenador digital y la capacidad de realizar observaciones astronómicas desde el espacio. De ello da cuenta pormenorizada Hugh Van Horn, uno de los astrofísicos que participaron directamente en el desciframiento de los secretos de las estrellas enanas blancas, a las que ha consagrado cincuenta años de investigación. Suyas son, entre otras, la demostración de que cristalizan a temperaturas a las que todavía pueden observarse y la teoría de las enanas blancas pulsantes.

Debemos a Friedrich Wilhelm Bessel la primera clave que señalaba la existencia de una nueva clase de estrellas, hoy conocidas como enanas blancas. Pero ni él ni nadie en aquellos comienzos del siglo xix se imaginaba los portentosos avances que habrían de requerirse para llegar a entender su naturaleza. Los astrónomos no sabían apenas nada de la estructura estelar. Procedían por comparación de sus propias mediciones de las posiciones de las estrellas en el firmamento con las determinaciones realizadas por Ptolomeo en Egipto, unos 2000 años antes. Dedujeron que algunas de las supuestas estrellas fijas se movían por el cielo, pero ignoraban a qué distancia se encontraban o cuán grandes eran, cuál era su constitución o cuánta energía radiaban. En ese tiempo, los astrónomos confiaban todas sus observaciones al ojo aplicado al telescopio; no se había inventado la fotografía.

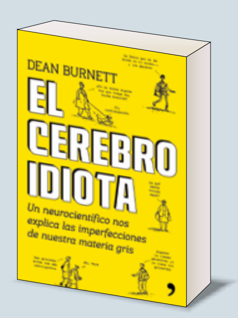
En 1820, Bessel instaló un círculo meridiano en el observatorio de Königsberg. El ingenio consistía en un círculo graduado fijado perpendicularmente al eje horizontal de un instrumento usado para observar el tránsito de estrellas a través del meridiano. El mecanismo permitía observaciones simultáneas de la ascensión recta y de la declinación de las estrellas (en esencia, longitud y latitud, respectivamente), con menos errores y más fácilmente detectables que con la aplicación de métodos precedentes. Bessel se proponía obtener posiciones precisas de miles de estrellas y construir así un marco de referencia para las coordenadas celestes de todas las estrellas. Mediante la medición de la paralaje, y conocida la distancia de la Tierra al Sol (una unidad astronómica), se podían determinar por triangulación las distancias hasta las estrellas más cercanas. Las mediciones realizadas en 1840 por Bessel de la estrella 61 Cygni revelaron una paralaje de 0,348 segundos de arco con un error medio de 0,14 segundos, por lo que se cifró la distancia a esa estrella en 590.000 unidades astronómicas, es decir, 2,9 pársecs. Bessel, que era matemático también, inventó una nueva clase de funciones (las funciones de Bessel), para resolver un problema de los movimientos planetarios.

Las mediciones precisas, tomadas por Bessel en 1844, de las posiciones habían mostrado que las estrellas brillantes Sirius y Procyon exhibían irregularidades en su movimiento a través del firmamento. En vez de observar un movimiento constante, como cabría esperar de una estrella solitaria, cada estrella oscilaba en una trayectoria rectilínea. El 10 de agosto de ese año, Bessel envió a John Herschel las características de su descubrimiento. Herschel no tardó en publicarlas en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. «Si tuviéramos que considerar a Sirius y Procyon estrellas dobles», escribía Bessel, «no constituirían ninguna sorpresa esos cambios en sus movimientos». Ahora bien, si esa fuera la explicación correcta, ¿por qué no se veían las estrellas compañeras, como era el caso en otros sistemas de estrellas binarias? Fue la primera alu-

NOVEDADES



BACTERIAS, BICHOS Y OTROS AMIGOS
DESCUBRE A NUESTROS ALIADOS MICROSCÓPICOS
David G. Jara
Ariel, 2016
ISBN: 978-84-344-2319-0
296 págs. (18,90 €)



EL CEREBRO IDIOTA
UN NEUROCIENTÍFICO NOS EXPLICA LAS IMPERFECCIONES DE NUESTRA MATERIA GRIS
Dean Burnett
Temas de Hoy, 2016
ISBN: 978-84-9998-540-4
408 págs. (19,90 €)



EL MUNDO COMO OBRA DE ARTE
EN BUSCA DEL DISEÑO PROFUNDO DE LA NATURALEZA
Frank Wilczek
Crítica, 2016
ISBN: 978-84-9892-961-4
520 págs. (28,90 €)

sión a la existencia de una clase novedosa de estrellas.

Por el tiempo en que Bessel anunciaba su descubrimiento de una estrella, no observada, compañera de Sirius, Alvan Clark iniciaba su carrera de óptico, consagrándose a la creación de telescopios de refracción, que usan lentes en lugar de espejos. Clark observó en 1862 la estrella débil que había previsto Bessel. A la estrella primaria se le dio el nombre de Sirius A, y a la más tenue, el de Sirius B. A finales del siglo XIX se conocían ya con bastante precisión las órbitas y las masas de ambas. Resultaba todavía un tanto desconcertante la escasa luminosidad de Sirius B, pero como se desconocía su temperatura, se creía que la razón estribaría en su baja temperatura. (Cuando se propusieron, a comienzos del siglo XX, las primeras estimaciones de la temperatura de Sirius B, la astronomía sufrió una fuerte sacudida.)

A finales del siglo XIX, en el Observatorio de la Universidad de Cambridge, Williamina P. Fleming recibió el encargo de ocuparse de la búsqueda exhaustiva y clasificación de cientos de miles de imágenes débiles de espectros estelares. Fleming descubriría la misteriosa naturaleza de Sirius B. En cierto sentido, parte de esta historia se remonta a Isaac Newton, quien, en el marco de sus experimentos en óptica, dirigió un haz de luz solar a través de un prisma y descubrió que se descomponía en todos los colores del espectro. «La luz», escribió, «es una mezcla heterogénea de rayos que se refractan de manera distinta». Siglo y medio más tarde, Joseph Fraunhofer acometió el estudio de la refracción de la luz de diferentes colores mediante diversos tipos de cristal. En el proceso, descubrió que el espectro de la luz solar estaba cruzado por líneas negras muy finas. (Esas estrías oscuras, o líneas de Fraunhofer, se producen siempre a la misma longitud de onda en el espectro.) Entre 1859 y 1862, Gustav Kirchhoff estableció tres importantes leyes de radiación que aportaban un fundamento sólido a las observaciones de Fraunhofer: 1) un sólido caliente y resplandeciente o un gas denso emiten un espectro continuo de radiación, sin líneas claras ni oscuras; 2) un gas caliente y difuso, como una llama, produce un espectro que consta de líneas brillantes; 3) cuando observamos un espectro continuo a través de un gas frío, presenta líneas oscuras a una longitud de onda característica de los elementos químicos del gas interpuesto. Las leyes de Kirchhoff permitieron a los astrónomos determinar la composición química de una estrella lejana [*véanse* «Los orígenes de la espectroscopía» I y II, por Dietrich Lemke; Investigación y Ciencia, enero y febrero de 2016].

Kirchhoff midió la longitud de onda de miles de líneas de Fraunhofer y mostró que coincidían con las líneas emitidas por los elementos químicos hidrógeno, hierro, sodio, magnesio, calcio, etcétera, por lo que concluyó que esos mismos elementos se daban en el Sol. Una rotunda verificación del método de Kirchhoff de análisis espectral fue la detección, en 1868, de líneas en el espectro solar de un elemento entonces desconocido, el helio, antes de su descubrimiento en la Tierra. Kirchhoff mostró que el espectro de la radiación térmica, denominada también radiación de cuerpo negro, dependía solo de la temperatura de la materia y no de ninguna de sus propiedades restantes. A partir de la medición de un amplio abanico de temperaturas, Josef Stefan descubrió en 1879 que la densidad total de energía de esa radiación térmica, sumando todas las longitudes de onda, variaba como la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Por tanto, la duplicación de la temperatura de una fuente de radiación incrementaba la densidad de energía en un factor de 16. En 1884, Ludwig Boltzmann aportó una fundamentación teórica rigurosa para ese comportamiento, hoy conocido como ley de Stefan-Boltzmann.

Confirmado el valor del análisis espectral, los astrónomos comenzaron a incorporar espectroscopios a sus telescopios para analizar espectros de las estrellas más brillantes. Esta tarea se vio muy aliviada con la aplicación de la técnica fotográfica a la astronomía desde mediados del siglo XIX, especialmente tras la introducción de placas fotográficas sensibles de gelatina de bromuro de plata en 1871. En 1890 se publicó el primer *Henry Draper Catalogue*, que recogía clasificaciones espectrales de 10.000 estrellas. En 1896, Annie Jump Cannon, del Observartorio de Harvard, recibió el encargo de examinar algunos espectros peculiares de esa cartografía general de Draper.

Tras sucesivos avances en el desarrollo de un sistema riguroso de clasificación espectral, los astrónomos reconocieron en 1910 que las enanas blancas eran una nueva clase de estrellas completamente diferente. Tuvo mucho que ver en ello el descubrimiento de 40 Eridani B, estrella

de décima magnitud en la constelación de Eridanus. Con su primaria, 40 Eridani A, estrella de cuarta magnitud, forma una binaria con un período de 200 años. En 1915, Ejnar Hertzsprung confirmó que Eridani B estaba suficientemente caliente para mostrar líneas de hidrógeno en su espectro. Ese mismo año de 1915, Walter S. Adams registró el espectro de Sirius B: toda una hazaña, pues Sirius A brilla muchísimo más que Sirius B y ambas se encuentran muy próximas. Cuando Adams reveló la fotografía, halló que el espectro de Sirius B solo contenía líneas de hidrógeno. Puesto que Sirius A contenía también líneas de hidrógeno, llegó a la conclusión de que ambas estrellas tenían la misma temperatura. Eridani B, Sirius A y Sirius B avalaban la existencia de una nueva clase de objetos. Debido al color blanco y a la tenuidad de su brillo (y, por consiguiente, su escaso tamaño) se les dio el nombre de enanas blancas.

Henrietta Leavit demostró, hace más de un siglo, que existía una relación directa entre el período de oscilación y la luminosidad intrínseca de ciertas estrellas. Cuanto más largo el período, más brilla. De ese criterio se valieron de inmediato los astrónomos para considerar «candelas patrón» a las cefeidas variables y así determinar distancias precisas de objetos remotos. Las cefeidas son estrellas muy brillantes, miles de veces más brillantes que el Sol.

¿Qué es lo que Perlmutter y sus colegas aprendieron gracias a las enanas blancas? Las enanas blancas que forman parte de un sistema binario y acretan materia de su compañera pueden acabar explotando en forma de supernovas de tipo Ia. Hacia finales del siglo xx, tras una década de trabajo, el Proyecto Cosmológico de Supernovas encontró decenas de supernovas de esta clase con un corrimiento hacia el rojo de entre 0,2 y 0,9. Se descubrieron todas en el Observatorio Internacional de Cerro Tololo, en Chile. Las supernovas con mayores desplazamientos al rojo se encontraban más alejadas de lo esperado, lo que permitió inferir que la aceleración del universo se estaba acelerando. Ese resultado condujo a una conclusión: solo el 28 por ciento de la densidad total de masa-energía del universo consta de materia ordinaria más materia oscura. Es decir, la mayor parte de la masa-energía del universo consta de una suerte de misteriosa «energía oscura», la cual suele asociarse a la constante cosmológica. En 1915, Einstein publicó su teoría general de la relatividad. Por aquel entonces, los astrónomos creían en un universo estático e inmutable, por lo que Einstein añadió un término a sus ecuaciones —la constante cosmológica— que permitía soluciones estáticas.

Los modelos cosmológicos basados en la teoría general de la relatividad que incluían solo radiación y materia ordinaria se encontraron con dificultades a la hora de explicar la formación de galaxias. Unos problemas que se aligeraron con la introducción de la materia oscura, que daría cuenta de la mayor parte de la materia existente en el universo. Inferida en las mediciones astronómicas de los años treinta, la primera prueba convincente de su existencia no llegó hasta los años setenta, cuando Vera Rubin y Kent Ford demostraron que los movimientos orbitales de las estrellas en torno a los centros de las galaxias requerían la presencia de una masa mucho mayor que la suministrada por la materia visible de la galaxia (estrellas, gas y polvo).

—Luis Alonso



Recopilación de Daniel C. Schlenoff



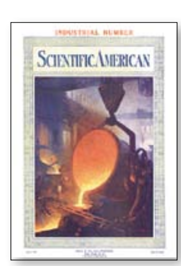
Junio 1966

La salud de un país

«¿Cuáles serán los efectos sobre la salud de la creciente concentración poblacional en ciudades y en grandes conurbaciones? Pese a las tensiones, ya conocidas, que la vida urbana ejerce sobre la salud, como son la contaminación del aire y el agua, la escasez de esta, la masificación, la deficiencia de las viviendas, el estrés de los transportes colectivos y el ritmo acelerado de la vida en una ciudad, no hay pruebas sólidas en la Inspección Sanitaria Nacional de EE.UU. que indiquen que el estado de salud de la población urbana sea peor que el de la rural. De hecho, numerosos datos indican cierta inferioridad de la población rural por lo que respecta tanto a la salud general como a las instalaciones y servicios sanitarios.»

La estructura de las enzimas

«Durante la primera mitad de este siglo, la principal preocupación de los bioquímicos fueron las relaciones metabólicas y estructurales entre las pequeñas moléculas de la célula viva. Se han estudiado intensivamente las reacciones químicas que sufren esas moléculas. Catalizadores específicos de esas reacciones son las grandes moléculas proteicas conocidas como enzimas, muchas de las cuales ya han sido depuradas y también estudiadas. Pero no fue hasta hace pocos años cuando las técnicas de difracción de rayos X posibilitaron determinar la estructura molecular de tales proteínas. Estas moléculas gigantes, que contienen de millares a decenas de millares de átomos, constituyen más de la mitad del peso seco de las células.»



Junio 1916

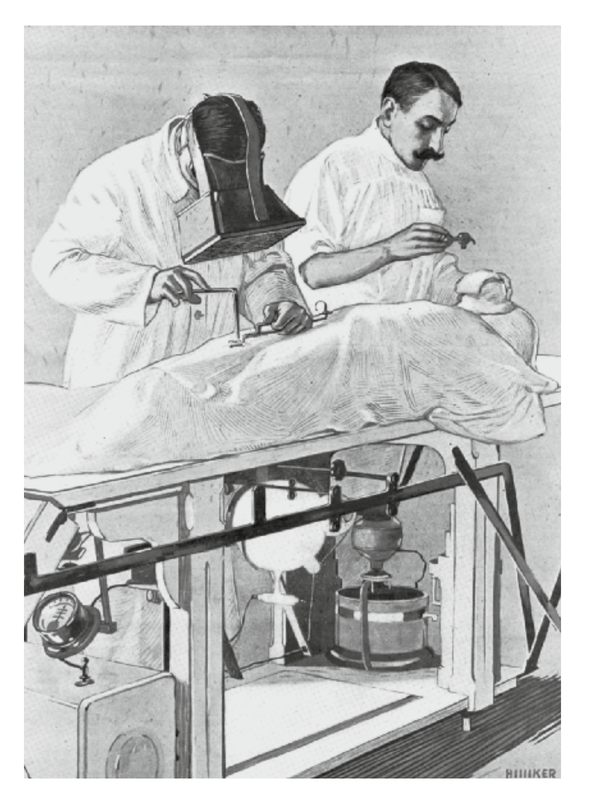
El rescate de Shackleton

«A Shackleton debe reconocerse el mérito de haber llevado de vuelta a sus hombres a las Shetland del Sur a través del hielo y el mar, y el de haber logrado llegar a Georgia del Sur a bordo de un bote. Al parecer no se tardará en enviar una expedición de auxilio desde las islas Malvinas o desde Argentina para rescatar al grueso del equipo, que se quedó en isla Elefante, y se confía en que el socorro llegue a tan intrépidos hombres a tiempo para evitar más sufrimientos. Me atrevería a decir que en la historia de la exploración antártica sería difícil dar con otro caso de expedición con unos resultados tan escasos frente a lo originalmente propuesto. Parece claro que Shackleton confió demasiado en la suerte y no consideró suficientemente la posibilidad de unos hielos en condiciones adversas.

—Henry Arctowski»

Rayos X y heridas de bala

«Para extraer una bala del cuerpo humano hay que saber exactamente su posición. El doctor Wullymoz, de Lausana, ha ideado un método para ver a esa profundidad directamente en una pantalla fluorescente. Un tubo de rayos Roentgen proyecta en una pantalla la sombra del proyectil. Si movemos el tubo, la sombra de la bala se mueve. El tubo de rayos Roentgen, la bobina y los accesorios están montados en un soporte sujeto bajo la mesa de operaciones, y el cirujano mantiene siempre a la vista la bala y los detalles anatómicos merced a un fluoroscopio sujeto a su cabeza (*véase la ilustración*).»



1916: Intervención quirúrgica con ayuda de rayos X.



Junio 1866

Prender fuego al mar

«Leemos en el *Commercial* de Boston: "El buque *S. T. Joseph*, recién llegado a puerto desde Liverpool, se salvó por poco de un desastre en su travesía. Parece que en la carga había un cajón con la indicación de sodio, que se colocó en la cubierta, con instrucciones de que si causaba alguna inquietud al humedecerse se arrojase por la borda. A poco de hacerse a la mar, el capitán le tomó aversión al cajón. Así que ordenó a dos de sus más viejos veteranos que con cuidado agarraran el cajón y lo tiraran por la popa. En cuanto tocó el agua, hubo una terrible explosión y se alzó una enorme columna de agua". Por naturaleza, el sodio produce una reacción violenta cuando se tira al agua. Las navieras que saben del riesgo se desentienden de él. Una razón del alto precio del sodio en este país es el cargo extra que cubre las pérdidas en el transporte.»

Hedores morbosos

«El hedor de la viruela se ha comparado con el olor de un macho cabrío; el de la rubéola, con el de un ganso recién desplumado; el de la escarlatina, con el del queso. El olor de la peste se ha comparado con el tufo de las flores de mayo, y el del tifus con el de un cosaco.
—Prof. Banks, *Medical Press and Circular*»

Scientific American Supplement, vol. LXXXI, n.º 2110, 10 de junio de 1916

ASTRONOMÍA

El caótico origen del sistema solar

Por Konstantin Batygin, Gregory Laughlin y Alessandro Morbidelli

Nuevas pruebas indican que las primeras etapas del sistema solar estuvieron caracterizadas por mundos errantes y asombrosas demostraciones de destrucción interplanetaria.



INFORME ESPECIAL
TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

Una nueva senda hacia la computación cuántica

Por Christopher R. Monroe, Robert J. Schoelkopf y Mikhail D. Lukin

¿Cómo garantizaremos la seguridad en la era de los ordenadores cuánticos?

Por Tim Folger



NEUROBIOLOGÍA

La desesperante sensación de picor

Por Stephani Sutherland

Solo ahora han comenzado a entenderse las bases moleculares de esta molestia corporal. Los resultados abren la puerta al tratamiento de los casos crónicos y agudos.



AGRICULTURA

Una cura para el suelo de África

Por John P. Reganold y Jerry D. Glover

La ínfima calidad del suelo devasta enormes áreas del continente vecino. Los agricultores africanos podrían aumentar las cosechas dejando crecer árboles y arbustos perennes entre las plantas cultivadas.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Sofía Cabezudo: *Apuntes*; Blanca Álvarez: *Apuntes*; Luis Cardona: *Redes tróficas reestructuradas*; Fabio Teixidó: *¿Dónde caen más rayos?* y *El coste de los recursos en un planeta que cambia*; Guzmán Sánchez: *Las defensas contra el cáncer*; Marián Beltrán: *¿Cómo nos cambió la fabricación de herramientas?*; Juan Manuel González Mañas: *Computadoras biológicas*; Alberto Ramos: *El enigma del neutrón*; José Óscar Hernández Sendín: *El arte de salvar reliquias de plástico*; Xavier Roqué: *La Fabrica de Vesalio y Alexander Grothendieck, de eminencia a eremita*; Pere Molera: *Materiales cerámicos*; J. Vilardell: *Hace...*

Copyright © 2016 Scientific American Inc.,
1 New York Plaza, New York, NY 10004-1562.

Copyright © 2016 Prensa Científica S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Revista de psicología y neurociencias

Mayo / Junio 2016 · N.º 78 · 6,90 € · menteycerebro.es

Mente&Cerebro

TENDENCIAS
Dispositivos de estimulación cerebral

Identidad
El peso de la memoria autobiográfica

Teoría del acicate
¿Incentivo o manipulación de los ciudadanos?

Evolución
El papel de las áreas parietales superiores

El concepto del alma

Presente en el imaginario colectivo, desaparece de la psicología

N.º 78 en tu quiosco

Para suscribirse:
www.investigacionyciencia.es
Teléfono: 934 143 344
administracion@investigacionyciencia.es

